



## Abschlußbericht

### Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets

Gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Themen-Nr.: 42.19.430/2003

Projekt/Förderkennzeichen (FKZ): 22008401

Langtitel: Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets

Kurztitel: Getreideverbrennung

Projekt: Energie- und Industriepflanzen

Projektleiter: Dr. habil. Armin Vetter

Abteilung: Pflanzenproduktion

Abteilungsleiter: Dr. habil. Armin Vetter

Laufzeit: 04/2003 bis 08/2005

Auftraggeber: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Namen der Bearbeiter: Dipl.-Ing. Thomas Hering,  
Dipl.-Ing. (FH) Denis Peisker

Jena, im Dezember 2005

<b>Tabellenverzeichnis</b>	05
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	06
<b>1. Einleitung</b>	12
<b>2. Ergebnisse Technikanalyse – Teilziel 1</b>	13
<b>2.1. Teilziel 1a – Physikalisch-mechanische und chemisch-stoffliche Brennstoffanalysen</b>	13
2.1.1 Länge und Durchmesser	14
2.1.2 Rohdichte	14
2.1.3 Schüttdichte	15
2.1.4 Abrieb	16
2.1.5 Zusammenfassung der physikalisch-mechanischen Brennstoffanalysen	17
2.1.6 Emissionsrelevante Inhaltsstoffe	21
2.1.6.1 Stickstoff	21
2.1.6.2 Schwefel	23
2.1.6.3 Chlor	24
2.1.7 Mineralische Inhaltsstoffe	25
2.1.7.1 Aschegehalt	26
2.1.7.2 Ascheerweichungsverhalten	27
2.1.8 Heizwert	28
2.1.9 Relevante Schwermetalle für die Ascheverwertung	29
2.1.10 Zusammenfassung der chemisch-stofflichen Brennstoffanalysen	30
<b>2.2 Teilziel 1b – Zuschlagstoffe</b>	32
2.2.1 Denaturierung	32
2.2.2 Markierung	32
2.2.3 Pelletierung von Halmgut	33
<b>2.3 Teilziel 1c – Zusammenstellung von Anlagen zur Verbrennung halmgutartiger Brennstoffe</b>	36
<b>2.4 Teilziel 1d – Verbrennungsversuche zur Emissionsmessung unter Prüfstands- und Praxisbedingungen</b>	39
2.4.1 Beschreibung der untersuchten Biomassefeuerungsanlagen	41
2.4.2 Überblick der durchgeführten Emissionsmessungen	44
2.4.3 Ergebnisse	47
2.4.3.1 Kohlenmonoxid (CO)	47
2.4.3.2 Staub – Messergebnisse, Abhängigkeit vom Aschegehalt und mögliche Ansätze der Emissionsminimierung	54

2.4.3.3 Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) – Messergebnisse, Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt und mögliche Ansätze der Emissionsminderung	67
2.4.3.4 Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> ) – Messergebnisse, Abhängigkeit vom Schwefelgehalt	75
2.4.3.5 Chlorwasserstoff (HCl) – Messergebnisse, Abhängigkeit vom Chlorgehalt	81
2.4.3.6 Dioxine, Furane (PCDD/F)/Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	87
<b>3. Zusammenfassung</b>	<b>89</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>90</b>
<b>Anhänge</b>	
I Fragebogen der Herstellerbefragung in deutscher und englischer Sprache	93
II Datenblätter des Dänischen Technologischen Institutes	99
III Messverfahren der Felduntersuchungen TLL/TLUG	107
<b>Anlagen zum Bericht</b>	
1: Kahl, T.; Kalies, M.; Hohmann, K.; Schröder, G.; Zeng, T. (2005): Endbericht zum F & E Vertrag 971/2 „Rückstandsuntersuchungen, Lebensweg- und Kostenbetrachtungen“. Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig, Eigenverlag, 147 S.	
2: Kneise, R. (2005): Endbericht zum F & E Vertrag 971/1 „Untersuchungen zur Pelletierung und zum Ascheverhalten von Stroh und Ganzpflanzen“. Thüringer Verfahrenstechnisches Institut für Umwelt und Energie e.V., Saalfeld, Eigenverlag, 70 S.	
3: Übersicht aller durchgeführten Analysen und Emissionsmessungen im FNR-Projekt „Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets (FKZ: 22008401)“	

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der untersuchten Brennstoffe	13
Tabelle 2:	Übersicht der Energie-Strohpelletchargen	14
Tabelle 3:	Vergleich physikalischer Parameter und ihre Einordnung zu den Grenzwerten für Holzpellets – Versuchskampagne 2003/04	19
Tabelle 4:	Vergleich physikalischer Parameter und ihre Einordnung zu den Grenzwerten für Holzpellets – Versuchskampagne 2004/05	20
Tabelle 5:	Darstellung der Ergebnisse der Schwermetallanalytik sowie weiterer relevanter Inhaltsstoffe	29
Tabelle 6:	Vergleich chemischer Brennstoffeigenschaften mit den Anforderungen nach DIN 51731 und ÖNORM M 7135 für die untersuchten kornartigen Brennstoffe	31
Tabelle 7:	Vergleich chemischer Brennstoffeigenschaften mit den Anforderungen nach DIN 51731 und ÖNORM M 7135 für die untersuchten pelletartigen Brennstoffe	31
Tabelle 8:	Vergleich chemischer Brennstoffeigenschaften mit den Anforderungen nach DIN 51731 und ÖNORM M 7135 für die untersuchten Energie-halmgutpellets	31
Tabelle 9:	Übersicht möglicher Markierungs- bzw. Vergällungsmittel für Getreide	33
Tabelle 10:	Übersicht der Hersteller von Getreidefeuerungsanlagen	37
Tabelle 11:	Übersicht der Hersteller von Strohfederungsanlagen	37
Tabelle 12:	Zusammenfassung bundesweiter Ergebnisse von Emissionsuntersuchungen an Kleinfeuerungsanlagen bei Einsatz von Getreide bzw. Halmgut-pellets	40
Tabelle 13:	Übersicht der durchgeführten Prüfstandsversuche (IE, Leipzig)	45
Tabelle 14:	Übersicht der durchgeführten Feldmessungen (TLL/TLUG)	46
Tabelle 15:	Grenzwerte für Holzfeuerungsanlagen für Brennstoffe nach § 3 Abs. 1 Nr. 4 bis 5a der 1. BImSchV	47
Tabelle 16:	Vergleich der Asche- und Schlackeanteile ausgewählter biogener Festbrennstoffe (Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S – 2003/04)	52

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vergleich der Schwankungsbreiten von Schüttdichten verschiedener Getreidearten	15
Abbildung 2:	Vergleich der Schüttdichten verschiedener Winterweizensorten auf Löß- bzw. Verwitterungsböden	16
Abbildung 3:	Vergleich der Abriebwerte unterschiedlicher Halmgutpelletchargen und Untersuchungsmethoden	18
Abbildung 4:	Vergleich der Stickstoffgehalte biogener Festbrennstoffe	22
Abbildung 5:	Vergleich der Stickstoffgehalte verschiedener Getreidearten	22
Abbildung 6:	Vergleich der Schwefelgehalte biogener Festbrennstoffe	23
Abbildung 7:	Vergleich der Chlorgehalte biogener Festbrennstoffe	24
Abbildung 8:	Vergleich der Kalium-, Natrium-, Magnesium-, und Calciumgehalte biogener Festbrennstoffe	26
Abbildung 9:	Vergleich der Aschegehalte biogener Festbrennstoffe	27
Abbildung 10:	Vergleich der Ascheschmelzpunkte biogener Festbrennstoffe	28
Abbildung 11:	Vergleich der Ascheschmelzpunkte der modifizierten Energiehalmgutpellets	35
Abbildung 12:	FERRO BIOMAT FB 23L	41
Abbildung 13:	REKA Anlage (Prinzipskizze)	42
Abbildung 14:	BAXI Anlage (Prinzipskizze)	42
Abbildung 15:	Ökotherm Vorofen-Brennmulden Feuerung (Prinzipskizze)	43
Abbildung 16:	AGRO 40 (Funktionsschema)	43
Abbildung 17:	Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH – 2003/04	48
Abbildung 18:	Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04	49
Abbildung 19:	Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener Halmgut-Pellets – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S 2004/05	49
Abbildung 20:	Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen im Teillastbereich – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04	50
Abbildung 21:	Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S – 2003/04	51

Abbildung 22: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflamm – 2004/05	52
Abbildung 23: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am 900 kW Kessel, Fa. Ökotherm – 2004/05	53
Abbildung 24: Vergleich der Staubkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH – 2003/04	54
Abbildung 25: Vergleich der Staubkonzentrationen (TA Luft) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04	56
Abbildung 26: Vergleich der Staubkonzentrationen (1. BlmSchV) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2004/05	56
Abbildung 27: Vergleich der Staubkonzentrationen (1. BlmSchV ) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen mit und ohne Elektrofilter – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2004/05	57
Abbildung 28: Vergleich der Staubkonzentrationen (TA Luft) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen im Teillastbereich – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04	58
Abbildung 29: Vergleich der Staubkonzentrationen (1. BlmSchV) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S – 2003/04	59
Abbildung 30: Vergleich der Staubkonzentrationen (1. BlmSchV) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflamm – 2004/05	60
Abbildung 31: Vergleich der Staubkonzentrationen (TA Luft) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am, Fa. Ökotherm – 2004/05	61
Abbildung 32: Abhängigkeit der Staubkonzentrationen vom Aschegehalt des Brennstoffs – Erhebung von Praxisdaten für Staub am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH und Labordaten für den Aschegehalt – 2003/04	62
Abbildung 33: Abhängigkeit der Staubkonzentrationen vom Aschegehalt des Brennstoffs – Erhebung von Praxisdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S und Labordaten für den Aschegehalt – 2003/04	62
Abbildung 34: Abhängigkeit der Staubkonzentrationen vom Aschegehalt des Brennstoffs – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S – 2003/04	63

Abbildung 35: Abhängigkeit der Staubkonzentrationen vom Aschegehalt des Brennstoffs – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S und Labordaten für den Aschegehalt – 2003/04	63
Abbildung 36: Abhängigkeit der Staubkonzentrationen vom Aschegehalt des Brennstoffs – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflam und Labordaten für den Aschegehalt – 2004/05	64
Abbildung 37: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH – 2003/04	67
Abbildung 38: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04	68
Abbildung 39: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen verschiedener Halmgutpellets – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2004/05	68
Abbildung 40: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT, Modell 2,5; Fa. BAXI A/S – 2003/04	69
Abbildung 41: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflam – 2004/05	69
Abbildung 42: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am 900 kW Kessel, Fa. Ökotharm GmbH – 2004/05	70
Abbildung 43: Abhängigkeit der Stickoxidkonzentrationen vom Stickstoffgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH und Labordaten für den Stickstoffgehalt – 2003/04	71
Abbildung 44: Abhängigkeit der Stickoxidkonzentrationen vom Stickstoffgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S und Labordaten für den Stickstoffgehalt – 2003/04	71
Abbildung 45: Abhängigkeit der Stickoxidkonzentrationen vom Stickstoffgehalt im Brennstoff – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S und Labordaten für den Stickstoffgehalt – 2003/04	72



Abbildung 46: Abhängigkeit der Stickoxidkonzentrationen vom Stickstoffgehalt im Brennstoff – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflammb GmbH und Labordaten für den Stickstoffgehalt – 2004/05	72
Abbildung 47: Vergleich der Schwankungsbreiten der Stickstoffgehalte verschiedener Getreidearten	73
Abbildung 48: Vergleich der Stickstoffgehalte verschiedener Winterweizensorten auf Löß- bzw. Verwitterungsböden	73
Abbildung 49: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH – 2003/04	75
Abbildung 50: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04	76
Abbildung 51: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2004/05	76
Abbildung 52: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S – 2003/04	77
Abbildung 53: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflammb GmbH – 2004/05	77
Abbildung 54: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am 900 kW Kessel, Fa. Ökotherm GmbH – 2004/05	78
Abbildung 55: Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentrationen vom Schwefelgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH und Labordaten für den Schwefelgehalt – 2003/04	78
Abbildung 56: Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentrationen vom Schwefelgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S und Labordaten für den Schwefelgehalt – 2003/04	79
Abbildung 57: Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentrationen vom Schwefelgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S und Labordaten für den Schwefelgehalt – 2003/04	79

Abbildung 58: Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentrationen vom Schwefelgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflamm GmbH und Labordaten für den Schwefelgehalt – 2004/05	80
Abbildung 59: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am, BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH – 2003/04	81
Abbildung 60: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04	82
Abbildung 61: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen verschiedener Halmgut-pellets – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2004/05	82
Abbildung 62: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen im Teillastbereich – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04	83
Abbildung 63: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT, Modell 2,5; Fa. BAXI A/S – 2003/04	83
Abbildung 64: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen verschiedener halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflamm – 2004/05	84
Abbildung 65: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am 900 kW Kessel, Fa. Ökotherm GmbH – 2004/05	84
Abbildung 66: Abhängigkeit der Chlorwasserstoffkonzentrationen vom Chlorgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH und Labordaten für den Chlorgehalt – 2003/04	85
Abbildung 67: Abhängigkeit der Chlorwasserstoffkonzentrationen vom Chlorgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S und Labordaten für den Chlorgehalt – 2003/04	85
Abbildung 68: Abhängigkeit der Chlorwasserstoffkonzentrationen vom Chlorgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S und Labordaten für den Chlorgehalt – 2003/04.	86

- Abbildung 69: Ergebnisse der PCDD/F- und PAK-Messung sowie der kontinuierlich gemessenen Kohlenmonoxidkonzentrationen bei Einsatz von Winterweizenstrohpellets (8mm) - Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflamm GmbH –26.04. bis 28.04.2005 87
- Abbildung 70: Ergebnisse der PCDD/F- und PAK-Messung sowie der kontinuierlich gemessenen Kohlenmonoxidkonzentrationen bei Einsatz von Winterroggenkörner - Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflamm GmbH –19.05., 20.05. und 23.05.2005 88

## **1. Einleitung**

Das Ziel des von der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) als Projektträger des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) geförderten Projektes „Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets“ war die Eruierung von Möglichkeiten der thermischen Verwertung von Getreide, Strohpellets, Mühlennebenprodukten und Mischungen von halmgut- und holzartigen Brennstoffen in Kleinfeuerungsanlagen mit einer thermischen Leistung kleiner 100 kW. Neben der Analyse wesentlicher Brennstoffparameter sowie der Erfassung des Entwicklungsstandes vorhandener Anlagentechniken zur Getreide- und Halmgutverbrennung in Europa, lag der Schwerpunkt des Projektes bei der Messung entstehender Emissionen. Parallel zu Prüfstandsuntersuchungen, welche vom Institut für Energetik und Umwelt gGmbH in Leipzig (IE) durchgeführt wurden (s. Anlage 1), fanden im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung der beiden in Jena ansässigen Thüringer Landesanstalten für Umwelt und Geologie (TLUG) sowie Landwirtschaft (TLL) Felduntersuchungen an mehreren Praxisanlagen statt.

Ergänzt wurden die Emissionsmessungen durch die Eruierung und Evaluierung potenzieller Zuschlagstoffe zur Verbesserung der physikalisch-mechanischen bzw. chemisch-stofflichen Eigenschaften von Halmgutpellets bzw. der Denaturierung von Getreidekörnern. Dazu wurden neben labortechnischen Untersuchungen, welche vom Thüringer Verfahrenstechnischen Institut für Umwelt und Energie e.V. in Saalfeld (VTI) ausgeführt wurden, auch großtechnische Praxisversuche in Zusammenarbeit mit der Pelletier- und Transportgesellschaft in Apolda (PTG) durchgeführt (s. Anlage 2).

Da die thermische Nutzung o. g. landwirtschaftlicher Biomassen im Rahmen dieses Projektes ganzheitlich betrachtet werden sollte, wird der Bericht durch die Darstellung der bei der Nutzung entstehenden Kosten (Teilziel 2) sowie die ökologischen Auswirkungen (Teilziel 3) vervollständigt (s. Anlage 1).

## 2. Ergebnisse Technikanalyse – Teilziel 1

### 2.1. Teilziel 1a – Physikalisch-mechanische und chemisch-stoffliche Brennstoffanalysen

Die physikalisch-mechanischen Untersuchungen zur Bestimmung der Parameter:

- A Länge und Durchmesser
- B Rohdichte
- C Schüttdichte und
- D Abrieb

führte die DBI-AUA GmbH in Freiberg für die relevanten Brennstoffe bzw. Brennstoffmischungen (s. Tab. 1, 2) in Anlehnung an die ÖNORM M 7135 sowie DIN 51731 für Holzbrennstoffe bzw. des an die ÖNORM angelehnten Zertifizierungsprogramms DIN*plus* durch /1/, /2/, /3/.

Die Bestimmung der geometrischen Maße erfolgte am IE für jeweils 10 Getreidekörner bzw. Pellets (Stroh, Kleie, Holz).

Die chemisch-stofflichen Analysen zur Bestimmung der Parameter:

- A N, S, Cl, K, Na, Mg, Ca
- B Aschegehalt und Ascheerweichungsverhalten
- C Heizwert
- D Schwermetalle

fanden hauptsächlich im Labor der TLL statt. Das Ascheerweichungsverhalten wurde vom Unterauftragnehmer DBI-AUA im Rahmen eines Werkvertrages analysiert. Parallel vorgenommene Untersuchungen zum Abrieb und zum Ascheerweichungsverhalten am VTI, mit den dortigen hauseigenen Methoden, dienten der Validierung der in den labortechnischen Untersuchungen zur Verbesserung der Pelleteigenschaften gewonnenen Erkenntnisse.

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Brennstoffe

Körner	Pellets	Sonstige
Roggen	Strohpellets <sup>1)</sup>	Holzhackschnitzel
Weizen	Getreideganzpflanzenpellets <sup>2)</sup>	Mischungen Getreide & Holzbrennstoff
Gerste	Kleiepellets	
Hafer	Holzpellets	
Triticale		
Raps		

<sup>1)</sup> In der Versuchskampagne 2003/2004 wurden Strohpellets für den konventionellen Verwendungszweck als Einstreupellets untersucht. In der Versuchskampagne 2004/2005 erfolgte die Untersuchung von 14 speziell für die energetische Verwertung konzipierten Strohpelletchargen.

<sup>2)</sup> Für die Pelletierung von Ganzpflanzen wurde aufgrund des festen Kornsitzes ausschließlich Triticale verwendet.

Nachdem sich die Unzulänglichkeiten der konventionell für Einstreuzwecke erzeugten Halmgutpellets für die energetische Verwertung herausgestellt hatten (siehe Versuchskampagne 2003/04, Teilziel 1 d), wurden auf Basis der Erkenntnisse der labortechnischen Untersuchungen

des VTI (s. Anlage 2) und unter Absprache mit dem Praxispelletierbetrieb (PTG) 14 Varianten zur Verbesserung der Pelleteigenschaften Abrieb und Ascheschmelzpunkt bei der Produktion unter Praxisbedingungen erarbeitet (s. Tab. 2).

Tabelle 2: Übersicht der Energie-Strohpelletchargen

Charge	Stroh/ Ganzpflanzenart	Matrize <sup>1)</sup>	Bemerkungen
PTG-01	Winterweizenstroh	6 mm	ohne Zuschlagstoffe
PTG-02	Winterweizenstroh	8 mm	ohne Zuschlagstoffe
PTG-03	Winterweizenstroh	6 mm	2 % Melasse
PTG-04	Winterweizenstroh	6 mm	0,5-1,0 % Mehl
PTG-05	Winterweizenstroh	6 mm	3 % Tonmehl
PTG-06	Winterweizenstroh	6 mm	2 % Melasse, 3 % Tonmehl
PTG-07	Winterroggenstroh	6 mm	ohne Zuschlagstoffe
PTG-7A	Winterroggenstroh	8 mm	ohne Zuschlagstoffe, großes Sieb
PTG-08	Winterroggenstroh	6 mm	2 % Melasse
PTG-09	Winterroggenstroh	6 mm	3 % Tonmehl
PTG-10	Winterroggenstroh	6 mm	2 % Melasse, 3 % Tonmehl
PTG-12	Triticaleganzpflanze	8 mm	ohne Zuschlagstoffe, kleines Sieb
PTG-12A	Triticaleganzpflanze	6 mm	ohne Zuschlagstoffe, kleines Sieb
PTG-14	Triticaleganzpflanze	6 mm	3 % Tonmehl

<sup>1)</sup> Bei der Verwendung der 8 mm Matrize handelt es sich um eine ältere Matrize, sodass es zu Abweichungen vom erwarteten Pelletdurchmesser kommen kann.

### 2.1.1 Länge und Durchmesser

Der Vergleich der ermittelten Kennwerte mit den Anforderungen der verwendeten Normen für "Presslinge aus naturbelassenem Holz" zeigt, dass Getreidekörner erwartungsgemäß diese hinsichtlich des Durchmessers nicht erfüllen (s. Tab. 3). Sie wiesen deutlich geringere Durchmesser auf als in den Normen gefordert. Für Halmgutpellets kann es zu Überschreitungen kommen, wenn eingesetzte Matrizen infolge hoher Durchsätze (> 1.000 t) einem entsprechend hohen Verschleiß unterliegen (s. Tab. 4). Außerdem ist ein gewisses produktionsbedingtes „Aufblähen“ der Halmgutpelletchargen bis zu ca. 10 % möglich. Ob die Ermittlung dieser Parameter für Körnerchargen relevant ist, bleibt zu hinterfragen. Bezüglich der Einhaltung der maximalen Länge der Brennstoffe müssen keine Einschränkungen gemacht werden.

### 2.1.2 Rohdichte

Bei der Bestimmung der Roh- bzw. Einzeldichte musste für die Chargen Weizen, Raps und teilweise für Roggen ein alternatives Verdrängungsverfahren verwendet werden (s. Kap. 3.1.1 Anlage 1), da das vorgeschriebene Verfahren nach DIN 52182 für diese Brennstoffe nicht anwendbar war. Die Untersuchungen zeigen, dass die erhöhten Anforderungen der ÖNORM M 7135 bzw. DIN *plus* nicht bei jedem Brennstoff eingehalten werden können. Neben Raps-, Hafer- und teilweise

Roggenkörnern weisen besonders Strohpellets für Einstreuzwecke (Strohpellets PTG bzw. VTI) sowie die mit einer 8 mm Matrize hergestellten Strohpellets Unterschreitungen der in den Normen geforderten Rohdichte auf. Die ermittelten Werte für Hafer liegen mit 0,86 kg/dm<sup>3</sup> sogar unterhalb der Anforderungen der DIN 51731 (s. Tab. 3 und 4).

### 2.1.3 Schüttdichte

Für die Schütt- bzw. Lagerdichte sind in den genannten Normen keine Grenzwerte definiert. Mit 460 kg/m<sup>3</sup> weist der untersuchte Hafer aufgrund des höheren Spelzanteiles (analog Gerste) neben den Strohpelletchargen für Einstreuzwecke (PTG 530 kg/m<sup>3</sup> und VTI 450 kg/m<sup>3</sup>) repräsentative, jedoch relativ niedrige Werte im Vergleich zu den weiteren Körnerchargen von 690 kg/m<sup>3</sup> für Rapskörner und bis zu 848 kg/m<sup>3</sup> für Winterweizenkörner auf (s. Tab. 3 und Abb. 1).

Weiterhin sind in Bezug auf die Schüttdichten klare Sortenunterschiede sowie ein nicht unwesentlicher Jahreseinfluss erkennbar (s. Abb. 2).

Auch die für die energetische Verwertung entwickelten Halmgutpelletchargen weisen geringere Schüttdichten als Körner auf (s. Tab. 4). Generell wurde festgestellt: *Je größer die eingesetzten Matrizen, umso geringer sind die zu realisierenden Schüttdichten.* Zuschlagstoffe wie Melasse, teilweise auch Tonmehl, erhöhen die Schüttdichten.

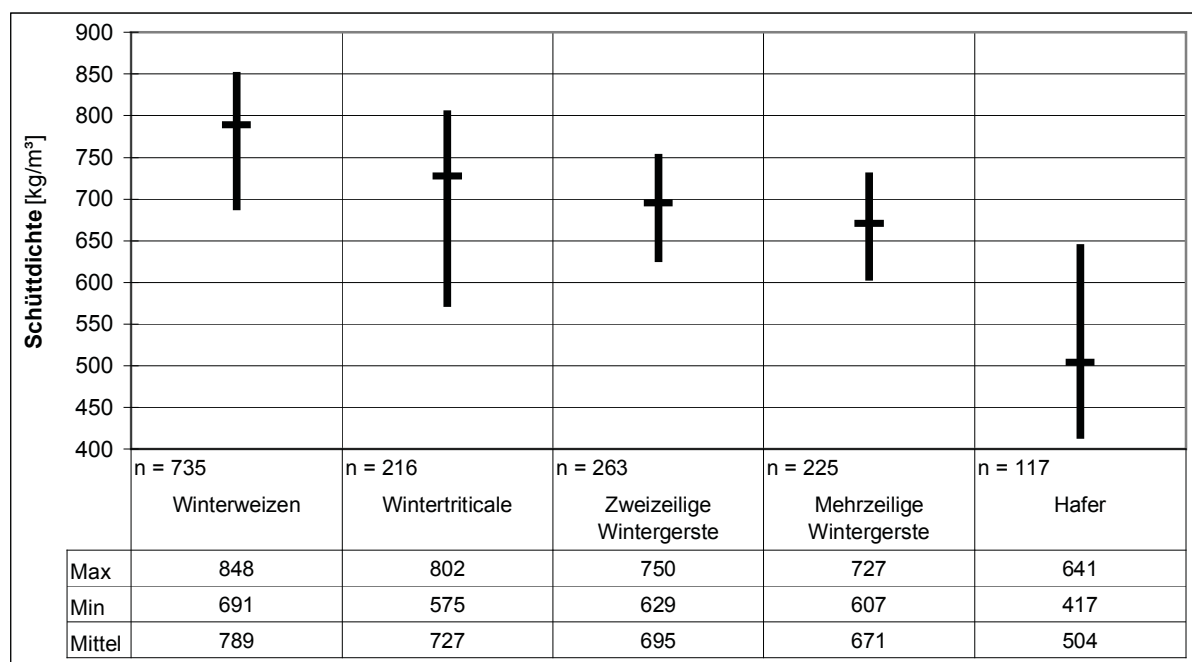


Abbildung 1: Vergleich der Schwankungsbreiten von Schüttdichten verschiedener Getreidearten /4/, /5/, /6/, /7/, /8/

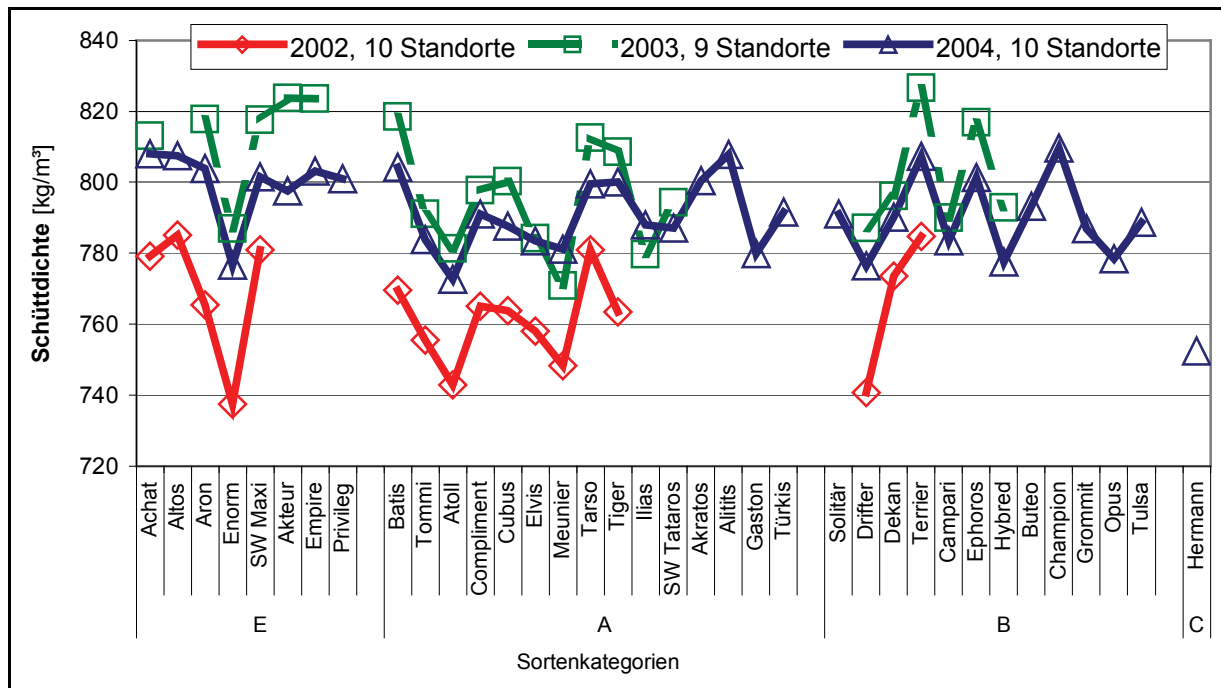


Abbildung 2: Vergleich der Schüttdichten verschiedener Winterweizensorten auf Löß- bzw. Verwitterungsböden, Sortenkategorien E, A, B und C /4/

#### 2.1.4 Abrieb

Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass die in den Pelletnormen angegebene Methodik zur Bestimmung des Abriebs (Ligno-Tester) für die Körnerchargen nicht geeignet ist, da die erforderliche Mindestkorngröße für die Abriebbbestimmung von 3,15 mm fast immer unterschritten wird (s. Tab. 3).

Es wurde daher durch das DBI-AUA eine modifizierte Probenvorbereitung vorgenommen, bei der das Probenmaterial in ein zylindrisches Gefäß eingefüllt und mehrfach auf eine feste Unterlage aufgesetzt wurde. Für die Bestimmung des Abriebs im Ligno-Tester werden nur die oberen Schichten des Probenmaterials aus diesem Gefäß verwendet, wodurch ein großer Teil des Feinkorns bereits vor der Analyse entfernt wird.

Neben den Untersuchungen für Roggenkörner, für die keine belastbaren Daten gewonnen werden konnten, war auch die Abriebbbestimmung von Hafer und Raps mit dem modifizierten Verfahren nicht möglich, da einzelne Körner durch das Probensieb des eingesetzten Ligno-Testers fielen.

Keine Einschränkungen gibt es bei der Analyse der Halmgutpelletchargen. Die ermittelten Werte der Versuchskampagne 2003/04 für den Abrieb der beiden Strohpelletchargen PTG und VTI überschreiten den Grenzwert der Normen für Holzpellets teilweise um mehr als den Faktor 7. Dies verdeutlicht die nur eingeschränkte Tauglichkeit der ursprünglich für Einstreuzwecke erzeugten Pellets für eine energetische Verwertung.



### 2.1.5 Zusammenfassung der physikalisch-mechanischen Brennstoffanalysen

Die Ergebnisse der im Projekt erarbeiteten Rezepturen für Energie-Halmgutpellets und die in der Praxisanlage durchgeführten Pelletierversuche lassen folgende **Schlussfolgerungen** zu:

1. Die hauseigene Untersuchungsmethode des VTI (Trommelverfahren) weist generell geringere Abriebwerte auf als die vom DBI-AUA bislang für Holzpellets als Standardmethode eingesetzte Methode (Ligno-Tester) und ist daher nur näherungsweise verwendbar (s. Abb. 3).
2. Generell weisen Pellets mit einem kleineren Pelletdurchmesser geringere Abriebwerte auf als Pellets mit einem größeren Pelletdurchmesser.
3. Ganzpflanzenpellets, i. d. R. Triticaleganzpflanzenpellets (Tri-GP), weisen deutlich geringere Abriebwerte auf als Strohpellets. Sie erfüllen in Bezug auf die Abriebwerte sicher die Anforderungen der Holzpelletnormen.
4. Abriebwerte < 2,3 %, gemäß den Anforderungen der Holzpelletnormen, sind mit Strohpellets ohne Zuschlagstoffe kaum einzuhalten. Hier sind Abriebwerte bis 4,0 % zu erwarten.
5. Die Zugabe von 2 % Melasse führt zu einer deutlichen Verringerung der Abriebwerte. Für die untersuchten Chargen Weizen- und Roggenstrohpellets konnten die Abriebwerte auf 2,0 bzw. 1,6 % reduziert werden.
6. Die Zumischung von Tonmehl führt zu keiner signifikanten Erhöhung der Abriebwerte. Teilweise wurden bei Verwendung von Tonmehl sogar geringere Abriebwerte festgestellt.
7. Die Zugabe von Mehl als Pelletierhilfsmittel scheint ungeeignet.

Zusammenfassend lässt sich aus den durchgeführten physikalischen Untersuchungen schlussfolgern, dass die Grenzwerte der Normen für "Presslinge aus naturbelassenem Holz" nur teilweise sowohl für die Bewertung von Körnerchargen als auch für Strohpellets herangezogen werden können. Hier müssen, aufgrund der Anforderungen der Feuerungstechnik hinsichtlich eines möglichst homogenen Brennstoffs, für landwirtschaftliche Biomassen geeignetere Normparameter und Nachweismethoden herangezogen bzw. entwickelt werden. Dabei sind die deutlichen Unterschiede zwischen Körnerchargen und Halmgutpellets zu beachten.

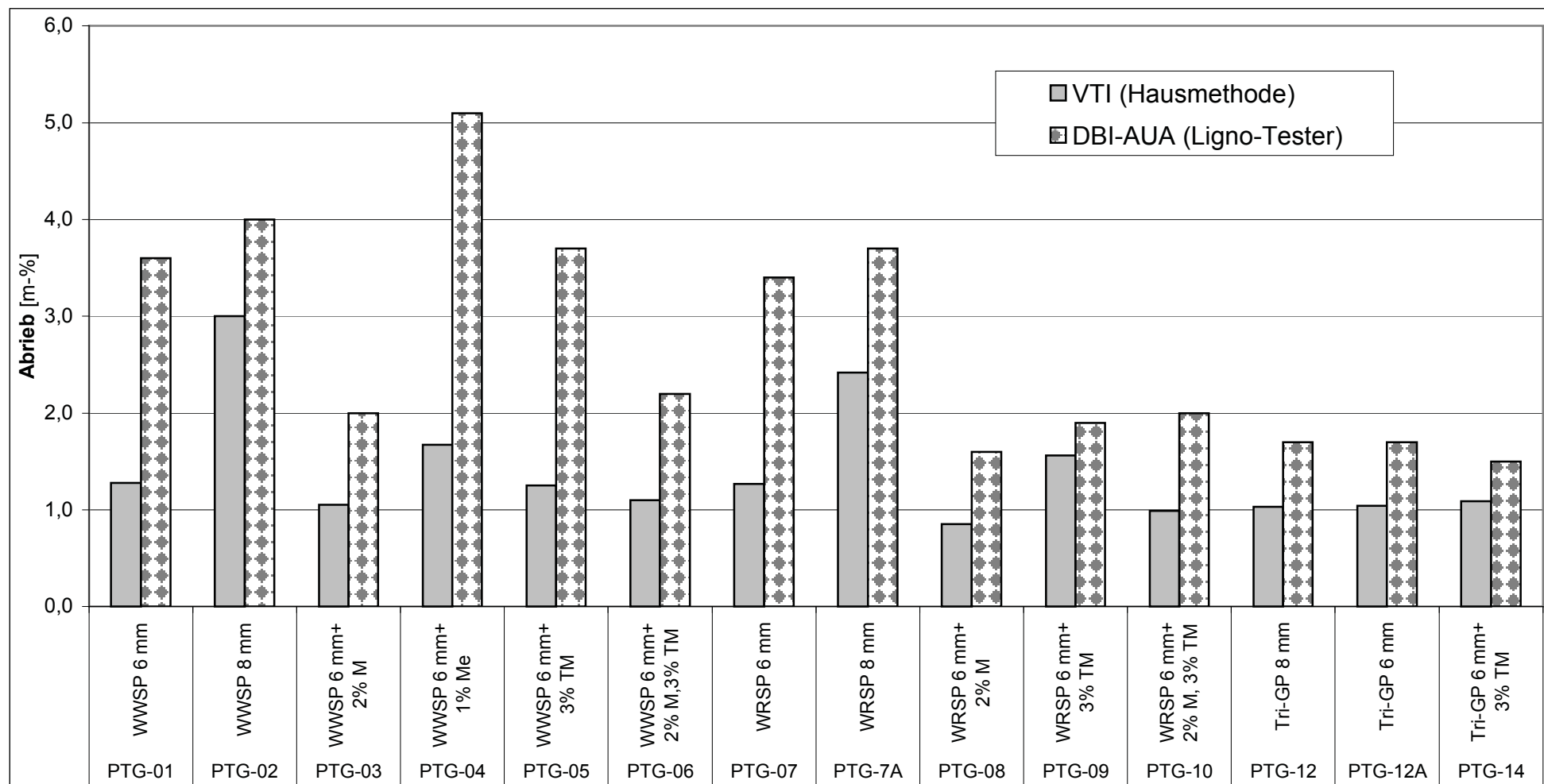


Abbildung 3 : Vergleich der Abriebwerte unterschiedlicher Halmgutpelletchargen und Untersuchungsmethoden  
M: Melasse; Me: Mehl; TM: Tonmehl;  
WWSP – Winterweizenstrohpellets; WRSP – Winterroggenstrohpellets; Tri-GP – Triticaleganzpflanzenpellets

Tabelle 3: Vergleich physikalischer Parameter und ihre Einordnung zu den Grenzwerten für Holzpellets – Versuchskampagne 2003/04

Parameter	Einheit	Grenzwerte nach		Brennstoffe										
		DIN 51731	ÖNORM M 7135	Raps	Gerste	Weizen	Roggen	Roggen (Widh.)	Triticale	Hafer	Strohpellets PTC	Strohpellets VTI	Kleipellets	Holzpellets
Durchmesser d	mm	mehrere Klassen <sup>1)</sup>	$4 \leq d < 10$ <sup>2)</sup>	<b>1,78</b>	<b>3,19</b>	<b>3,37</b>	<b>2,27</b>	<b>2,84</b>	<b>3,27</b>	<b>2,64</b>	6,40	8,93	5,15	6,15
Länge l	mm		$\leq 5 * d$ <sup>3)</sup>	1,78	10,58	6,20	7,30	7,58	7,37	10,30	16,74	16,33	12,85	21,90
Verhältnis l/d				1,00	3,32	1,84	3,22	2,67	2,25	3,90	2,62	1,83	2,49	3,56
Rohdichte $\rho_{ROH}$	kg/dm <sup>3</sup>	$1,0 \leq \rho_{ROH} \leq 1,4$	$\geq 1,12$	<b>1,04</b> <sup>5)</sup>	1,24	1,29 <sup>5)</sup>	1,27	<b>1,11</b> <sup>5)</sup>	1,30	<b>0,86</b>	<b>1,04</b>	<b>1,10</b>	1,27	1,27
Schüttdichte $\rho_s$	kg/dm <sup>3</sup>	k.A.	k.A.	0,69	0,71	0,82	0,75	0,72	0,79	0,46	0,53	0,45	0,67	0,65
Abrieb <sup>4)</sup>	m-%	k.A.	$\leq 2,3$	k.A. <sup>6)</sup>	0,56	0,5	k.A. <sup>6)</sup>	k.A. <sup>6)</sup>	0,9	k.A. <sup>6)</sup>	<b>16,4</b>	<b>2,8</b>	1,5	0,6

<sup>1)</sup> Maße für Holzpellets nach DIN 51731

Bezeichnung	Länge [cm]	Durchmesser [cm]
HP 1	> 30	> 10
HP 2	15 bis 30	6 bis 10
HP 3	10 bis 16	3 bis 7
HP 4	< 10	1 bis 4
HP 5	< 5	0,4 bis 1

<sup>2)</sup> Der anzugebende Durchmesser muss innerhalb einer Toleranz von  $\pm 10$  % des angegebenen Durchmessers liegen.

<sup>3)</sup> Maximal 20 % der Masse dürfen Längen von bis zu  $7,5 * d$  aufweisen.

<sup>4)</sup> Die Bestimmung des Abriebes erfolgt mittels Ligno-Tester.

<sup>5)</sup> Parameter mit alternativen Verdrängungsverfahren bestimmt, nach DIN 52182 nicht möglich.

<sup>6)</sup> Ligno-Tester für Abriebbestimmung nicht geeignet, da Körner kleiner als die erforderliche Mindestkorngröße von 3,15 mm sind (Wi-Raps) bzw. durch das interne 2 mm-Sieb des Ligno-Testers fallen und dem Abrieb zugerechnet werden (z. B. Hafer, Wi-Roggen).

k.A. – kein Grenzwert in der Norm definiert

Tabelle 4: Vergleich physikalischer Parameter und ihre Einordnung zu den Grenzwerten für Holzpellets – Versuchskampagne 2004/05

Parameter	Einheit	Grenzwerte		Brennstoffe													
		DIN 51 731	ÖNORM M 7135	PTG-01	PTG-02	PTG-03	PTG-04	PTG-05	PTG-06	PTG-07	PTG-7A	PTG-08	PTG-09	PTG-10	PTG-12	PTG-12A	PTG-14
Durchmesser d	mm	mehrere Klassen <sup>1)</sup>	$4 \leq d < 10$ <sup>2)</sup>	6,50	<b>10,27</b>	6,59	6,51	6,62	6,40	6,55	<b>10,15</b>	6,41	6,66	6,51	<b>10,06</b>	6,74	6,57
Länge l	mm		$\leq 5 * d$ <sup>3)</sup>	18,14	16,92	17,30	18,24	20,55	19,71	17,11	11,93	16,99	16,12	17,62	33,80	19,10	22,70
Verhältnis l/d				2,79	1,65	2,62	2,80	3,10	3,08	2,61	1,18	2,65	2,42	2,71	3,36	2,83	3,46
Rohdichte $\rho_{ROH}$	kg/dm <sup>3</sup>	$1,0 \leq \rho_{ROH} \leq 1,4$	$\geq 1,12$	1,21	<b>1,14</b>	1,25	1,31	<b>1,09</b>	1,28	1,29	1,21	1,31	1,31	1,30	<b>1,18</b>	1,24	1,26
Schüttdichte $\rho_s$	kg/dm <sup>3</sup>	k.A.	k.A.	0,57	0,46	0,61	0,63	0,55	0,61	0,59	0,55	0,65	0,61	0,65	0,54	0,61	0,63
Abrieb <sup>4)</sup>	m-%	k.A.	$\leq 2,3$ <sup>4)</sup>	<b>3,6</b>	<b>4,0</b>	2,0	<b>5,1</b>	<b>3,7</b>	2,2	<b>3,4</b>	<b>3,7</b>	1,6	1,9	2,0	1,7	1,7	1,5
Abrieb <sup>5)</sup>	m-%	k.A.	$\leq 2,3$ <sup>4)</sup>	1,3	<b>3,0</b>	1,1	1,7	1,3	1,1	1,3	<b>2,4</b>	0,9	1,6	1,0	1,0	1,0	1,1

<sup>1)</sup> Maße für Holzpellets nach DIN 51731

Bezeichnung	Länge [cm]	Durchmesser [cm]
HP1	> 30	> 10
HP2	15 bis 30	6 bis 10
HP3	10 bis 16	3 bis 7
HP4	< 10	1 bis 4
HP5	< 5	0,4 bis 1

<sup>2)</sup> Der anzugebende Durchmesser muss innerhalb einer Toleranz von  $\pm 10$  % des angegebenen Durchmessers liegen.

<sup>3)</sup> Maximal 20 % der Masse dürfen Längen von bis zu  $7,5 * d$  aufweisen.

<sup>4)</sup> Die Bestimmung des Abriebes erfolgte mittels Ligno-Tester durch die DBI-AUA.

<sup>5)</sup> Die Bestimmung des Abriebes erfolgte mittels Hausmethode durch das VTI (Trommelverfahren).

k.A. – kein Grenzwert in der Norm definiert

Neben den physikalisch-mechanischen Brennstoffeigenschaften wurden auch die chemisch-stofflichen Eigenschaften analysiert. Die Ergebnisse für die in den Verbrennungsversuchen eingesetzten Brennstoffe sind in den Tabellen 5 bis 8 aufgeführt und hinsichtlich der Einhaltung der o. g. Holzpelletnormen bewertet. Des Weiteren werden in den Abbildungen 3 bis 8, die in der Datenbank der TLL vorhandenen Analysendaten mit daraus abgeleiteten Schwankungsbreiten und Mittelwerten relevanter biogener Festbrennstoffe dargestellt.

### **2.1.6 Emissionsrelevante Inhaltsstoffe**

Erwartungsgemäß überschreiten die untersuchten Körner- und Halmgutpelletchargen die Anforderungen der gegebenen Normen für Holzpellets hinsichtlich des Stickstoff-, Chlor- und Schwefelgehaltes teilweise sehr deutlich (s. Tab. 6 bis 8).

Angemerkt sei, dass die Industrieholzpellets die mit Abstand höchsten Stickstoffwerte aller untersuchten biogenen Brennstoffe enthalten und den maximal zulässigen Wert beider Normen deutlich überschreiten. Die im Vergleich zur DIN 51731 strengeren Anforderungen der ÖNORM M 7135 werden für den Chlor- und Schwefelgehalt ebenfalls geringfügig überschritten.

#### **2.1.6.1 Stickstoff**

Getreidekörner weisen im Vergleich zu Regelbrennstoffen der 1.BImSchV deutlich erhöhte Konzentrationen an Stickstoff auf, weshalb auch erhöhte Stickoxidemissionen zu erwarten sind (s. Abb. 3, 46, 47). Mit Ausnahme von Rapskörnern, bei denen mit bis zu 3,85 % i. d. TM besonders hohe Werte nachgewiesen wurden, liegt der Stickstoffgehalt für Getreidekörner im Mittel mit ca. 2,0 % Stickstoff i. d. TM um Faktor 3,3 höher gegenüber den verschiedenen untersuchten Stroharten (im Mittel ca. 0,6 %). Ähnliche Gehalte wie Stroh weisen Pappeln aus Kurzumtriebsplantagen (0,56 %) auf. Sie liegen damit über den Werten für Laub- und Nadelholz (0,49 bzw. 0,14 %). Auffällig sind jedoch die großen Schwankungsbreiten bei den Werten für Laubholz, die jedoch nicht Gegenstand der Untersuchungen des laufenden Projektes waren.

Innerhalb der Getreidekörner weisen Roggenkörner, mit durchschnittlich 1,72 % i. d. TM, um bis zu 27 % geringere Stickstoffanteile auf als Weizenkörner (2,36 %).

Darüber hinaus liegen zahlreiche Untersuchungen zu den Stickstoffgehalten von Körnerchargen in der Landwirtschaft vor (s. Abb. 4), welche meist als Rohproteingehalte, bezogen auf 86 % TS, angegeben werden. Der Umrechnungsfaktor Rohprotein/Stickstoff beträgt bei Weizen 5,7 und bei den restlichen Getreidearten 6,25.

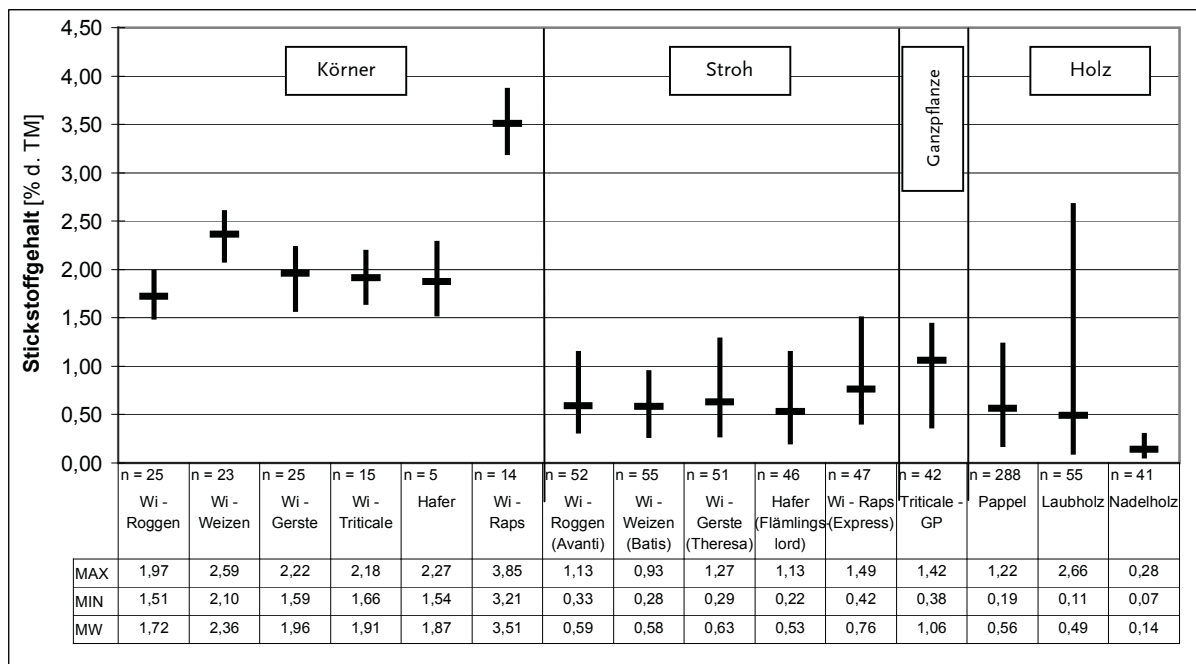


Abbildung 4: Vergleich der Stickstoffgehalte biogener Festbrennstoffe (Datenbank TLL, /10/, /11/)

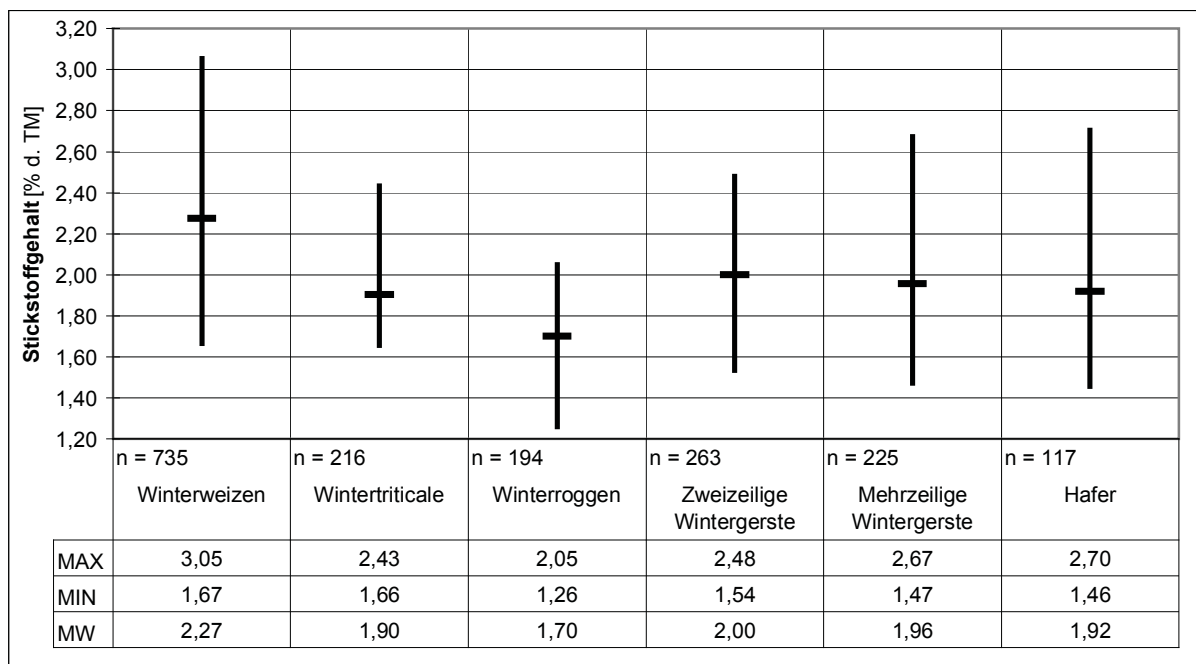


Abbildung 5: Vergleich der Stickstoffgehalte verschiedener Getreidearten /4/, /5/, /6/, /7/, /8/, /9/

### 2.1.6.2 Schwefel

In Bezug auf die Schwefelgehalte gilt, dass die Gehalte der Körner sowie der Halmgutpellets ausnahmslos über den Grenzwerten der Holzpelletnormen liegen (s. Tab. 6 bis 8). Dabei liegen die mittleren Schwefelgehalte der untersuchten Getreidekörner mit durchschnittlich 0,16 % i. d. TM in engen Schwankungsbreiten (0,12 bis 0,20 %) um Faktor 1,6 über dem Niveau der Getreidestrohchargen (0,10 %) bzw. um ca. Faktor 4 über holzartigen Brennstoffen (s. Abb. 6).

Bei der Betrachtung von Ölsaaten bzw. deren Stroh, im vorliegenden Fall am Beispiel Raps, ist neben deutlich höheren Schwefelgehalten, im Mittel ca. 0,38 % i. d. TM für Rapskörner und 0,43 % i. d. TM für Rapsstroh, auch mit einer wesentlich höheren Schwankungsbreite der Gehalte zu rechnen (0,33 bis 0,52 % bzw. 0,13 bis 0,74 %). Ähnliche Ergebnisse sind auch bei anderen Kruzifern zu erwarten.

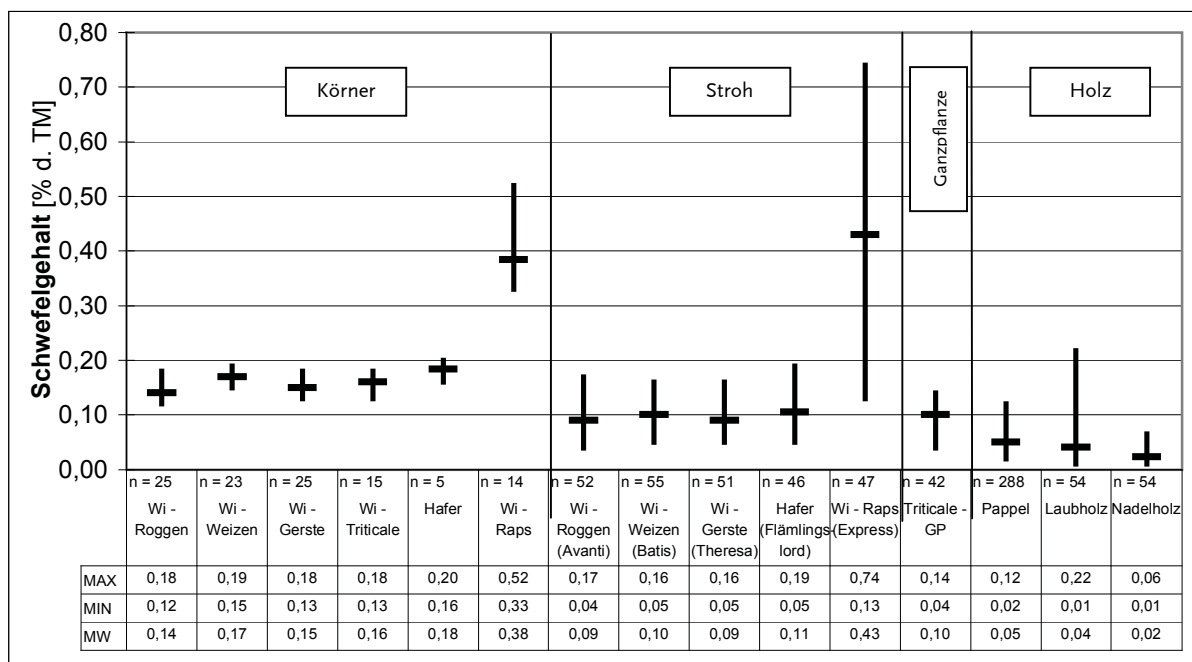


Abbildung 6: Vergleich der Schwefelgehalte biogener Festbrennstoffe ( Datenbank TLL, /10/, /11/ )

### 2.1.6.3 Chlor

Allgemein bekannt ist, dass halmgutartige Biomassen höhere Chlorgehalte aufweisen als Waldrestholz bzw. Energieholz aus Kurzumtriebsplantagen. Die vorliegenden Untersuchungen bestätigen diese Aussage, zeigen jedoch deutlich die Unterschiede zwischen Korn und Stroh. Während bei allen untersuchten Körnerchargen mit sehr geringen Schwankungsbreiten (Minimum 0,02 % und Maximum 0,18 %) mittlere Chlorgehalte von 0,08 % i. d. TM nachgewiesen wurden, lagen bei den Stroharten die Mittelwerte mit 0,23 % i. d. TM für Nacktgetreidearten um etwa Faktor 3 und bei Spelzgetreidearten bzw. Rapsstroh (0,55 %) um ca. Faktor 7 höher als bei den Körnerchargen. Die Schwankungsbreiten sind bei den Stroharten wesentlich größer. Stroh von Nacktgetreidearten (Weizen und Roggen), welches relativ reif geerntet wird, wies Minimalgehalte von 0,02 % und Maximalgehalte bis zu 0,73 % i. d. TM auf. Die Schwankungsbreite bei Stroh von Spelzgetreidearten (Gerste und Hafer), welches relativ „grün“ geerntet wird, liegt zwischen 0,03 % (Minimum) und 1,69 % (Maximum) i. d. TM. Triticaleganzpflanze nehmen bei den Schwankungsbreiten (0,01 - 0,53 %) sowie in Bezug auf den Mittelwert (0,16 %) erwartungsgemäß eine Zwischenstellung zwischen Stroh und Körnern ein. Einzelwerte für Pappeln und Laubholz erreichen durchaus das Niveau der Körnerchargen.

Im Vergleich mit zugelassenen Brennstoffen der 1.BImSchV, wie z. B. Stroh, verdeutlichen die Ergebnisse die verhältnismäßig geringen Chlorgehalte der Getreidekörner (s. Abb. 7).

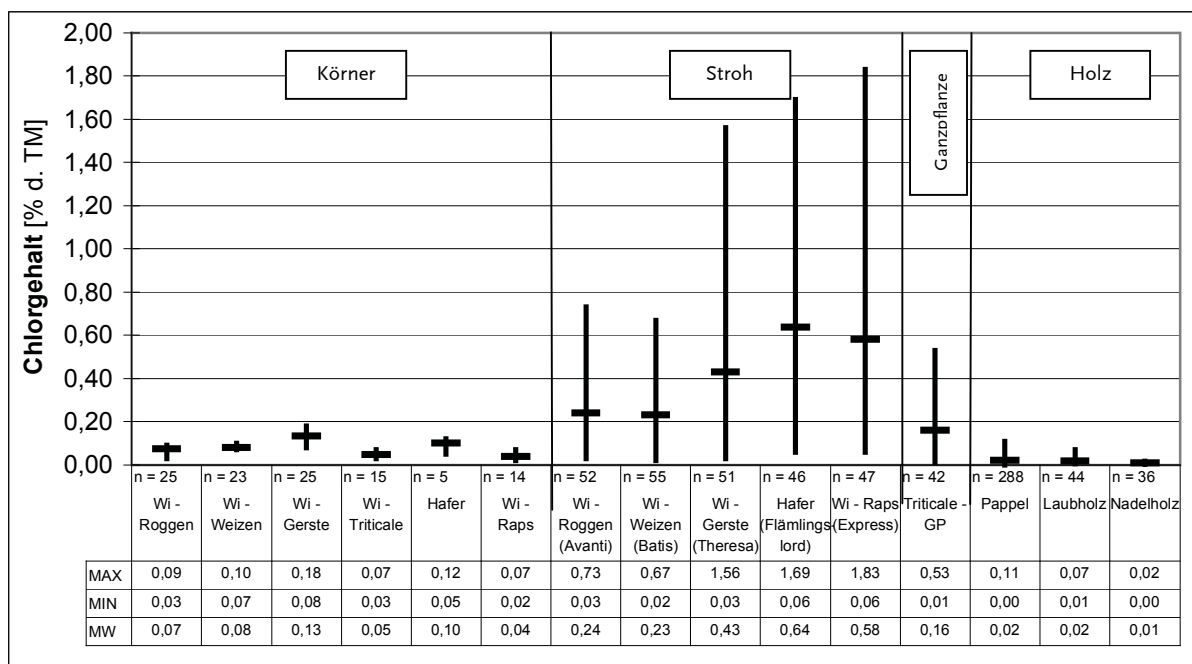


Abbildung 7: Vergleich der Chlorgehalte biogener Festbrennstoffe (Datenbank TLL, /10/, /11/)



### **2.1.7 Mineralische Inhaltsstoffe**

Bei der Verschlackungsneigung besonders relevant sind die Gehalte an Kalium, Calcium und Magnesium. Kalium wirkt dabei schmelzpunktsenkend und Calcium schmelzpunkterhöhend. Die Wirkung von Magnesium auf den Ascheschmelzpunkt von Biomassen ist nicht eindeutig geklärt. Bei Untersuchungen von HARTMANN zu Holzbrennstoffen wurde eine schmelzpunktsenkende Wirkung ermittelt /10/. Ergebnisse aus Untersuchungen mit Halmgütern zeigten für diese eine erhöhende Wirkung /12/.

Getreidekörner weisen im Durchschnitt mit ca. 0,5 % i. d. TM im Vergleich zu Stroh um Faktor 3 bis 5 geringere Kaliumgehalte auf (s. Abb. 8). Im Vergleich zu Waldresthölzern bzw. Pappeln aus Kurzumtriebsplantagen sind die Werte etwa doppelt so hoch. Rapskörner und Triticaleganzpflanzen zeigen um etwa Faktor 1,5 erhöhte Werte gegenüber Getreidekörnern.

Die Calciumgehalte bei Getreidekörnern liegen, mit Ausnahme von Hafer, mit Werten von 0,04 bis 0,08 % i. d. TM auf relativ niedrigem Niveau und sind mit ca. Faktor 10 deutlich geringer als bei Stroh und Holz. Auffällig sind die für Getreidekörner relativ hohen Kalziumgehalte bei Hafer (0,14 %) und im Vergleich der Stroharten die deutlich höheren Werte für Rapsstroh. Bei Rapskörnern bzw. Triticaleganzpflanzen liegen die Werte für Kalzium um Faktor 10 bzw. 5 höher als im Durchschnitt für Getreidekörner.

Daraus lassen sich die deutlich höheren Ascheerweichungspunkte für die holzartigen Brennstoffe sowie Rapsstroh und Haferkörner teilweise erklären (s. Abb. 10). Überraschend sind die Unauffälligkeiten der Elementgehalte bei Gerstenkörnern.

Die fehlenden Mittelwerte einzelner Biomassen bei den Natriumgehalten sind darauf zurückzuführen, dass bei vielen Proben der Natriumgehalt unterhalb der Nachweisgrenze von 35 mg/kg TM bei Analyse mittels Röntgen-Fluoreszenz (RFA) lag, welche seit dem Jahr 2004 bei der TLL Anwendung findet.

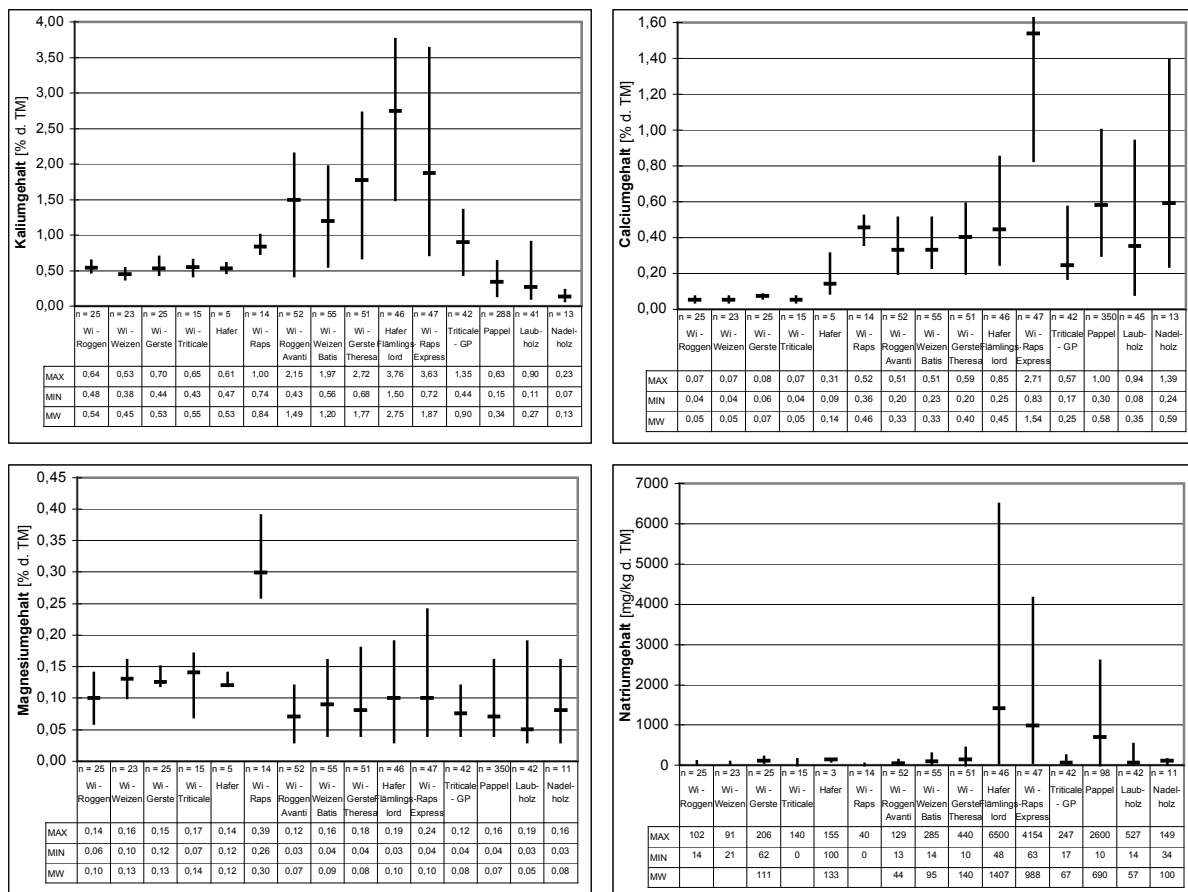


Abbildung 8: Vergleich der Kalium-, Natrium-, Magnesium-, und Calciumgehalte biogener Festbrennstoffe (Datenbank TLL, /10/, /11/)

### 2.1.7.1 Aschegehalt

In Bezug auf den Energiegehalt biogener Festbrennstoffe sowie für die Auslegung der Ascheaustragsysteme von besonderem Interesse ist der Anteil der nicht brennbaren Bestandteile. Diese werden als Staub über das Rauchgassystem ausgetragen oder fallen als Asche im Kessel an (s. Abb. 9). Getreidekörner weisen im Mittel Aschegehalte von 1,6 bis 3,5 % i. d. TM auf und liegen damit zwischen naturbelassenem Waldholz (0,6 bis 0,8 %) an der unteren Grenze und den relativ hohen Ascheanteilen der einzelnen Stroharten (5,5 bis 8 %) an der oberen Grenze. Pappeln aus Kurzumtriebsplantagen verursachen im Mittel 2,0 % i. d. TM ähnliche Aschegehalte wie die Getreidekörner. Vergleicht man die Getreidekörner untereinander so kann festgestellt werden, dass die Aschegehalte bei Gerste und Hafer (2,5 und 3,5 %) durch den Spelzanteil etwa 1,5-fach bzw. doppelt so hoch liegen wie bei Weizen und Roggen (1,6 und 1,7 %). Ganzpflanzentriticale und Rapskörner weisen im Mittel Aschegehalte von 5,0 und 4,4 % i. d. TM auf und liegen damit zwischen Getreidekörnern und Stroh. Neben den relativ hohen mittleren Aschegehalten der einzelnen Stroharten sind hier auch die großen Schwankungsbreiten von 2,6 (Minimum) bis 12,8 % i. d. TM (Maximum) für die Einzelwerte zu beachten.

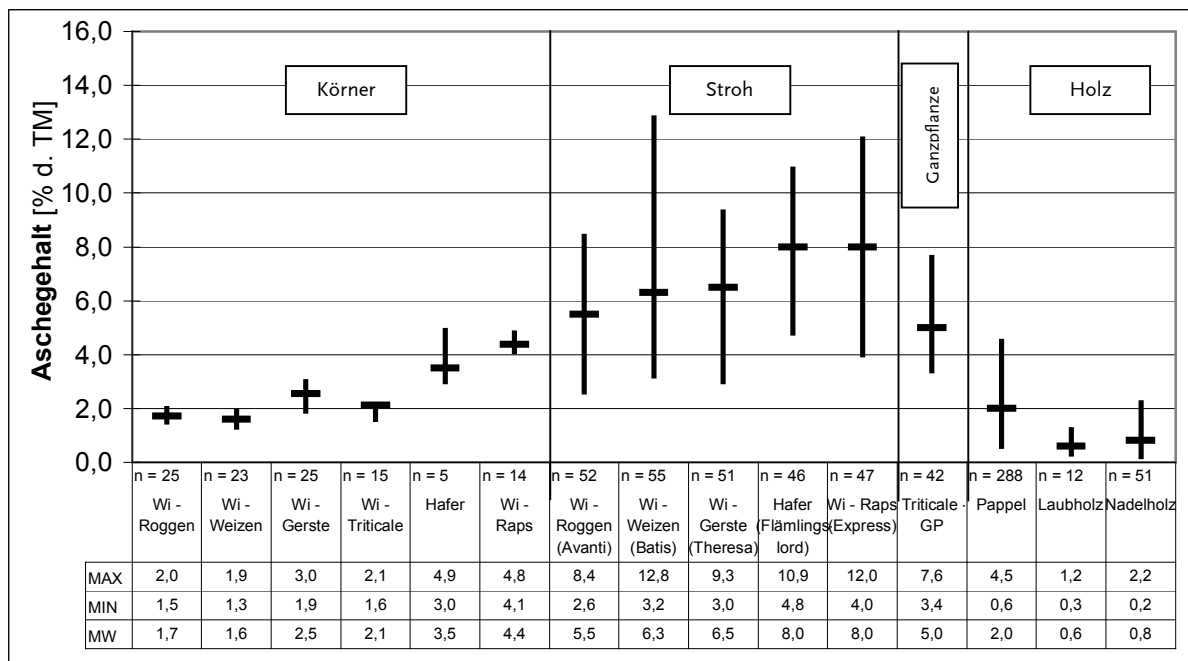


Abbildung 9: Vergleich der Aschegehalte biogener Festbrennstoffe (Datenbank TLL, /10/, /11/)

### 2.1.7.2 Ascheerweichungsverhalten

Der niedrigere Ascheschmelzpunkt landwirtschaftlicher Haupt- und Nebenprodukte ist teilweise problematisch in Bezug auf die Funktionssicherheit sowie das Emissionsverhalten von Feuerungsanlagen bei der energetischen Verwertung dieser Brennstoffe. In der Vergangenheit wurden beim Einsatz dieser Stoffe in herkömmlichen Holzfeuerungsanlagen immer wieder Störungen im Betriebsverlauf durch starke Verschlackungen im Feuerraum, an den Wärmetauschern und Rauchgasleitungen nachgewiesen /13/, /14/.

Die in den Laboruntersuchungen bereits nachgewiesenen deutlichen Unterschiede zwischen holzartigen und halmgutartigen Brennstoffen aber auch die Unterschiede innerhalb der halmgutartigen Brennstoffe wurden durch die Verbrennungsversuche auf dem Prüfstand als auch an den Praxisanlagen bestätigt (s. Abb. 10). Während es bei holzartigen Brennstoffen erst ab einem Temperaturbereich von ca. 1100 °C zu ersten Versinterungserscheinungen der Aschen kommt, beginnt dieser Prozess bei den Körnern von Nacktgetreidearten, wie z. B. Roggen und Weizen, bereits ab ca. 700 °C. Auffällig ist, dass Körner von Spelzgetreidearten, z. B. Gerste mit 1160 °C und Hafer mit 1140 °C, ähnlich hohe Ascheerweichungstemperaturen aufweisen wie die holzartigen Brennstoffe. Die Ascheerweichungstemperaturen für Getreidestroh, Ganzpflanzentriticale und Rapskörner liegen mit ca. 800 bis 900 °C auf einem mittleren Niveau zwischen den holzartigen Brennstoffen (1100 bis 1200 °C) und den Körnern von Nacktgetreidearten (700 °C). Nur bei Raps wurden mit ca. 1000 °C höhere Werte für das Stroh gegenüber den Werten für das Korn mit 910 °C in Bezug auf die Sintertemperatur ermittelt. Der Einfluss von Zuschlagstoffen bei der Pelletierung von Halmgut auf das Ascheschmelzverhalten ist im Kapitel 2.2.3 dargestellt.

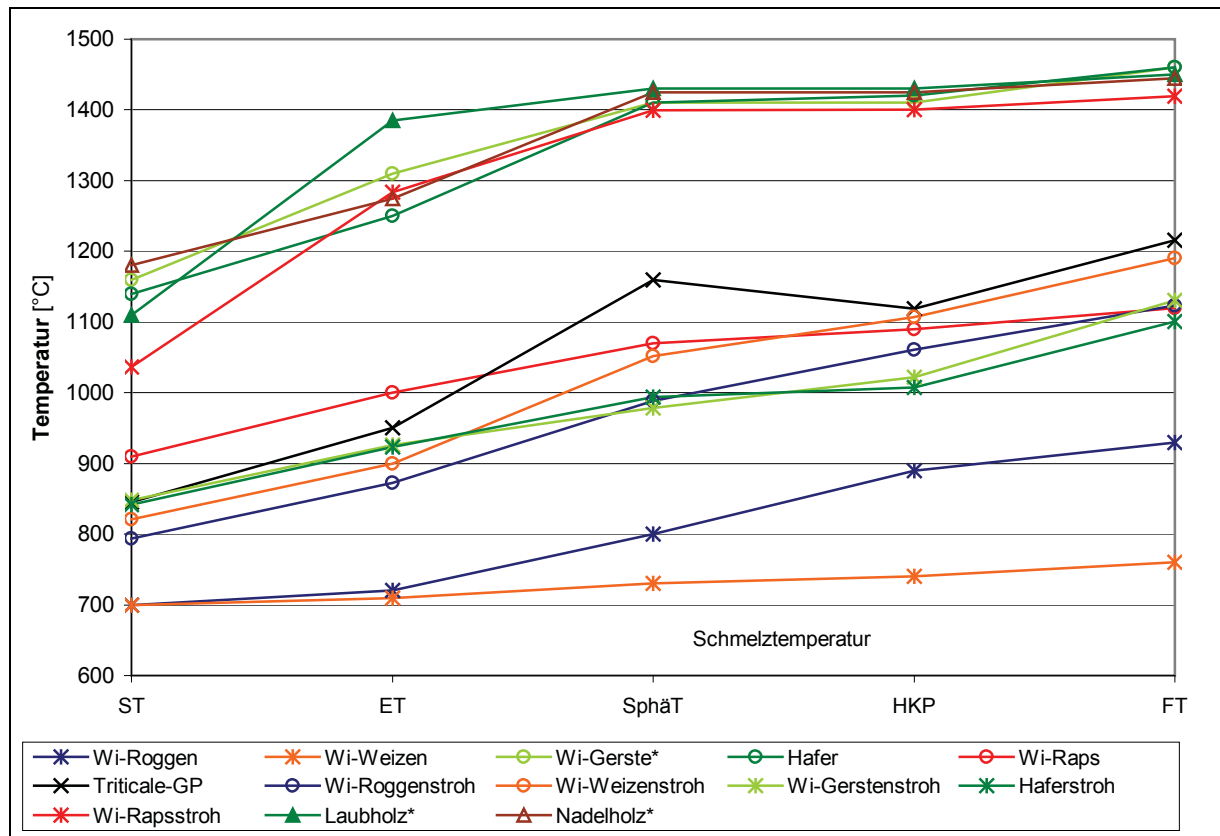


Abbildung 10: Vergleich der Ascheschmelzpunkte biogener Festbrennstoffe (Datenbank TLL, /10/, /11/) ST – Schmelztemperatur; ET – Erweichungstemperatur; Sphät – Sphärischtemperatur; HKP – Halbkugeltemperatur; FT – Fließtemperatur nach DIN 51730  
\* nur Schmelztemperatur

### Im Wesentlichen können 3 Brennstoffgruppen hinsichtlich des Ascheschmelzverhaltens unterschieden werden:

1. Gruppe mit hohen Ascheerweichungstemperaturen (> 1000 °C)  
z.B.: Laubholz, Nadelholz, Kurzumtriebsholz, Körner von Spelzgetreidearten (Gerste, Hafer), Rapsstroh
2. Gruppe mit mittleren Ascheerweichungstemperaturen (ca. 800 - 900 °C)  
z.B.: Getreidestroh, Triticaleganzpflanze, Rapskorn
3. Gruppe mit niedrigen Ascheerweichungstemperaturen (ca. 700 °C)  
z.B.: Körner von Nacktgetreidearten (Roggen, Weizen)

#### 2.1.8 Heizwert

In Bezug auf den Energiegehalt biogener Festbrennstoffe ist neben dem Asche- besonders der Wassergehalt von Bedeutung. Bei der Einhaltung der geforderten Wassergehalte ist aufgrund der Lagerungsfähigkeit ein maximaler Wassergehalt von 14 % für Getreidekörner und 9 % für Rapskörner einzuhalten. Eine weitergehende Einschränkung analog der Holzpelletnormen von 10 bzw. 12 % wird daher für Körnerchargen als wenig sinnvoll erachtet.

Nahezu alle in den Verbrennungsversuchen eingesetzten Strohpellets erreichten nicht die geforderten Heizwerte der Holzpelletnormen (s. Tab. 6 bis 8). Mit Werten um 17,0 bis 17,5 MJ/kg

wird vor allem die im Vergleich mit der DIN 51731 höhere Anforderung der ÖNORM nicht erreicht. Rapskörner besitzen mit 27,1 MJ/kg einen für die DIN 51731 zu hohen Heizwert.

### 2.1.9 Relevante Schwermetalle für die Ascheverwertung

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Schwermetallanalytik sowie weiterer relevanter Inhaltsstoffe dargestellt.

Die in Bezug auf eine mögliche Ascheverwertung besonders relevanten Brennstoffparameter (As, Hg, Cd, Pb, Cu, Cr, Ni, Tl, Zn) unterscheiden sich hinsichtlich der einzelnen Biomassesortimente teilweise erheblich. Die höchsten Gehalte sind bei den holzartigen Biomassen zu verzeichnen. Diese sind teilweise auf die höheren Rindenanteile sowie den Anbau von Schnellumtriebsplantagen auf Sonderstandorten zurückzuführen. Die geringsten Anteile von Schwermetallen sind bei den Getreidekörnern, gefolgt von den Ganzpflanzen und dem Stroh nachweisbar.

Tabelle 5: Darstellung der Ergebnisse der Schwermetallanalytik sowie weiterer relevanter Inhaltsstoffe (Datenbank TLL, /10/, /11/)

Element	Einheit	Getreidekörner n = 77 <sup>1)</sup>		Stroh n = 250 <sup>2)</sup>		Triticale-GP n = 42 <sup>3)</sup>		Pappel		Waldrestholz	
		MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
As	mg/kg TM	0,09	< 0,02	0,34	0,02	0,17	0,02	0,09 n = 219	0,02 n = 219	1,10 n = 19	0,02 n = 19
Hg	µg/kg TM	3,4	< 0,5	28,0	4,0	22,0	3,0	700 n = 345	2 n = 345	120 n = 18	10 n = 18
Cd	mg/kg TM	0,07	0,01	0,60	0,01	0,11	0,02	1,57 n = 344	0,10 n = 344	0,4 n = 31	0,06 n = 31
Pb	mg/kg TM	0,157	0,004	1,57	0,05	1,8	0,1	0,79 n = 312	0,03 n = 312	10,8 n = 32	0,5 n = 32
Cu	mg/kg TM	6,1	0,8	5,2	2,0	3,9	2,1	7,1 n = 344	1,8 n = 344	8,5 n = 70	1,5 n = 70
Cr	mg/kg TM	1,14	< 0,03	2,8	0,02	2,0	0,1	5,1 n = 280	0,01 n = 280	12,3 n = 17	1,4 n = 17
Ni	mg/kg TM	2,55	< 0,07	8,0	0,04	0,8	0,1	k. A.	k. A.	10,0 n = 10	2,0 n = 10
Tl	µg/kg TM	1,9	< 0,3	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
P	mg/kg TM	0,5	0,24	0,33	0,04	0,26	0,06	0,70 n = 350	0,05 n = 350	0,18 n = 61	0,01 n = 61
Si	mg/kg TM	0,45	0,01	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Al	mg/kg TM	266	< 5	987	5	783	11	k. A.	k. A.	797 n = 47	6 n = 47
Mn	mg/kg TM	45	12	95	7	48	10	k. A.	k. A.	2470 n = 53	121 n = 53
Fe	mg/kg TM	186	23	877	17	677	50	k. A.	k. A.	557 n = 50	33 n = 50
Zn	mg/kg TM	36	12	81	3	32	5	80 n = 312	7 n = 312	102 n = 65	8 n = 65
Br	mg/kg TM	6,5	< 1	84	2	17	2	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Sr	mg/kg TM	4,3	1,4	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.

<sup>1)</sup> Tl: n = 65, Br, Si: n = 28

<sup>2)</sup> Br: n = 136

<sup>3)</sup> Br: n = 22

k. A. keine Angabe

### **2.1.10 Zusammenfassung der chemisch-stofflichen Brennstoffanalysen**

Wie schon bei den physikalisch–mechanischen Eigenschaften wird deutlich, dass die für holzartige Brennstoffe erarbeiteten Normen für die Klassifizierung von Getreidekörnern und Halmgutpellets ungeeignet sind. Lediglich für die Parameter Wassergehalt und Heizwert können Getreidekörner die Vorgaben in den meisten Fällen einhalten und eventuell nach Anpassung für eine Normierung der landwirtschaftlichen Haupt- und Nebenprodukte herangezogen werden. Bei den Halmgutpellets kann nur die Vorgabe für den Wassergehalt sicher eingehalten werden (s. Tab. 6 bis 8).

Tabelle 6: Vergleich chemischer Brennstoffeigenschaften mit den Anforderungen nach DIN 51731 und ÖNORM M 7135 für die untersuchten kornartigen Brennstoffe

Parameter	Einheit	Brennstofftechnische Anforderung nach		Brennstoffe					
		DIN 51731	ÖNORM M 7135	Wi - Roggen	Wi - Weizen	Wi - Gerste	Wi - Triticale	Hafer	Wi - Raps
Wassergehalt	% d. TM	≤ 12,0	≤ 10,0	9,8	9,9	9,7	<b>11,2</b>	8,7	7,0
Aschegehalt	% d. TM	≤ 1,5	≤ 0,5 <sup>1)</sup>	<b>1,5</b>	<b>1,3</b>	<b>2,2</b>	<b>1,6</b>	<b>4,9</b>	<b>3,7</b>
N - Gehalt	% d. TM	≤ 0,3	≤ 0,3	<b>1,8</b>	<b>2,6</b>	<b>2,2</b>	<b>2,1</b>	<b>2,3</b>	<b>3,7</b>
Cl - Gehalt	% d. TM	≤ 0,03	≤ 0,02	<b>0,05</b>	<b>0,07</b>	<b>0,10</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>
S - Gehalt	% d. TM	≤ 0,08	≤ 0,04	<b>0,12</b>	<b>0,16</b>	<b>0,15</b>	<b>0,14</b>	<b>0,16</b>	<b>0,46</b>
Heizwert (wf)	MJ / kg	17,5 ≤ Hu <sub>(wf)</sub> ≤ 19,5	≥ 18,0	18,1	18,5	18,4	18,3	18,6	27,1

Tabelle 7: Vergleich chemischer Brennstoffeigenschaften mit den Anforderungen nach DIN 51731 und ÖNORM M 7135 für die untersuchten pelletartigen Brennstoffe

Parameter	Einheit	Brennstofftechnische Anforderung nach		Brennstoffe				
		DIN 51731	ÖNORM M 7135	Strohpellets (PTG)	Strohpellets (VTI)	WWKP	Ind. - Holzpellets	DIN - Holzpellets
Wassergehalt	% d. TM	≤ 12,0	≤ 10,0	7,0	6,2	8,9	5,3	8,3
Aschegehalt	% d. TM	≤ 1,5	≤ 0,5 <sup>1)</sup>	<b>9,7</b>	<b>6,0</b>	<b>6,0</b>	0,8	0,3
N - Gehalt	% d. TM	≤ 0,3	≤ 0,3	<b>1,2</b>	<b>0,8</b>	<b>2,7</b>	<b>4,2</b>	0,1
Cl - Gehalt	% d. TM	≤ 0,03	≤ 0,02	<b>0,36</b>	<b>0,37</b>	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>	0,004
S - Gehalt	% d. TM	≤ 0,08	≤ 0,04	<b>0,12</b>	<b>0,15</b>	<b>0,17</b>	<b>0,05</b>	0,02
Heizwert (wf)	MJ / kg	17,5 ≤ Hu <sub>(wf)</sub> ≤ 19,5	≥ 18,0	<b>17,5</b>	18,0	18,7	18,4	19,5

Tabelle 8: Vergleich chemischer Brennstoffeigenschaften mit den Anforderungen nach DIN 51731 und ÖNORM M 7135 für die untersuchten Energiehalmgutpellets

Parameter	Einheit	Brennstofftechnische Anforderung nach		Brennstoffe													
		DIN 51731	ÖNORM M 7135	PTG-01	PTG-02	PTG-03	PTG-04	PTG-05	PTG-06	PTG-07	PTG-7A	PTG-08	PTG-09	PTG-10	PTG-12	PTG-12A	PTG-14
Wassergehalt	% d. TM	≤ 12,0	≤ 10,0	6,1	5,4	5,7	5,5	6,3	5,7	5,6	4,5	5,0	5,0	4,6	5,6	6,5	7,5
Aschegehalt	% d. TM	≤ 1,5	≤ 0,5 <sup>1)</sup>	<b>7,3</b>	<b>6,7</b>	<b>8,1</b>	<b>7,5</b>	<b>8,9</b>	<b>8,2</b>	<b>6,5</b>	<b>6,0</b>	<b>5,7</b>	<b>7,6</b>	<b>8,8</b>	<b>11,5</b>	<b>9,0</b>	<b>8,5</b>
N - Gehalt	% d. TM	≤ 0,3	≤ 0,3	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,8</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>1,4</b>	<b>1,0</b>	<b>1,2</b>
Cl - Gehalt	% d. TM	≤ 0,03	≤ 0,02	<b>0,27</b>	<b>0,29</b>	<b>0,22</b>	<b>0,27</b>	<b>0,26</b>	<b>0,26</b>	<b>0,35</b>	<b>0,34</b>	<b>0,33</b>	<b>0,34</b>	<b>0,31</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,17</b>
S - Gehalt	% d. TM	≤ 0,08	≤ 0,04	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>	<b>0,12</b>	<b>0,10</b>	<b>0,09</b>	<b>0,10</b>	<b>0,10</b>	<b>0,10</b>	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>
Heizwert (wf)	MJ / kg	17,5 ≤ Hu <sub>(wf)</sub> ≤ 19,5	≥ 18,0	<b>17,6</b>	<b>17,5</b>	<b>16,6</b>	<b>17,4</b>	<b>16,6</b>	<b>17,3</b>	<b>17,7</b>	<b>17,7</b>	<b>17,3</b>	<b>16,6</b>	<b>17,2</b>	<b>16,3</b>	<b>17,1</b>	<b>16,9</b>

<sup>1)</sup> Der Aschegehalt darf bis zu 0,8 % betragen, wenn das verwendete naturbelassene Holz bereits einen natürlichen höheren Aschegehalt aufweist.

## **2.2. Teilziel 1b – Zuschlagstoffe**

Die durchgeführten Untersuchungen möglicher Zuschlagstoffe zur Denaturierung, Pelletierung bzw. Verbesserung des Verbrennungsverhaltens wurden in Zusammenarbeit mit der BLE sowie den Unterauftragnehmern VTI und PTG durchgeführt. Schwerpunkte der Arbeiten lagen bei der Eruiierung potenzieller Zuschlagstoffe und der Durchführung von Tests zur Minimierung des Abriebes bzw. zur Erhöhung des Ascheschmelzpunktes von Halmgutpellets im Labormaßstab. Der Stand der Technik bei Kompaktierverfahren, theoretische Überlegungen zum Einfluss von Zuschlagstoffen und die Ergebnisse der kleintechnischen Erprobung ist in Anlage 2 Kapitel 3 aufgeführt. Diese Ergebnisse bildeten in Abstimmung mit der PTG die Grundlage für eine großtechnische Praxiserprobung geeigneter Rezepturen und Größenklassen. Die dabei erzeugten Halmgutpelletchargen wurden ausführlich in mehreren Feuerungsanlagen bzw. Leistungsbereichen untersucht (s. Kap. 2.4).

### **2.2.1. Denaturierung**

Ergänzend zu den im FNR-Forschungsbericht zur „Prüfung der Gebrauchstauglichkeit von Markierungsmitteln bei Non-Food-Getreide und dessen Eignung für die thermische Verwertung“ dargestellten Möglichkeiten wurden im Verlauf des Projektes weitere Mittel eruiert und teilweise geprüft. Tabelle 9 gibt einen Überblick der eruierten Zusatzstoffe /15/.

Es ist festzustellen, dass es gegenwärtig keine Möglichkeit der wirksamen Denaturierung von Getreidekornchargen gibt, ohne schwerwiegende Kontaminationen der Ausgangsstoffe, wie z. B. beim Einsatz von quecksilberhaltigen Verbindungen, in Kauf zu nehmen. Diese wurden an Hühnern im Rahmen früherer Untersuchungen durch die TLL getestet und verworfen. Die Prüfung der Wirksamkeit der von der TLL vorgeschlagenen fetten Öle, wie z. B. Korianderöl, wurde durch die BLE, mit freundlicher Unterstützung von Frau Bausch, getestet, führte aber nur zu einer verzögerten Aufnahme durch die entsprechend getesteten Tiergruppen.

### **2.2.2. Markierung**

Ergänzend zu den Ergebnissen aus dem bereits o. g. Projekt, kam es zur Prüfung weiterer Mittel, wie z. B. Türkisblau (Patentblau E 131) der Fa. Heinrich Karow Nachf. KG. Es konnte jedoch keine bessere Farbwirkung/Preisrelation erreicht werden, sodass die im o. g. Bericht getesteten Mittel weiterhin als Optimum angesehen werden können.



Tabelle 9: Übersicht möglicher Markierungs- bzw. Vergällungsmittel für Getreide

	Menge
<b>Markierungsmittel/Farbstoffe</b>	
Pigmentpräparationen (z.B. Dispers Blau) <sup>1)</sup>	3 l/t
Lebensmittelfarben (z.B. E133 Basovit Blau) <sup>1)</sup>	3 l/t
Naphtalin	0,25 %
Eisenoxid <sup>2)</sup>	0,25 %
<b>Vergällungsmittel</b>	
Terpentinöl <sup>2)</sup>	0,1 - 0,5 %
Lavendelöl <sup>2)</sup>	
Rosmarinöl <sup>2)</sup>	
Betulaöl <sup>2)</sup>	
Kampferöl (rot bzw. weiß) <sup>2)</sup>	2 %
Korianderöl <sup>1)</sup>	k.A.
ätherische Öle <sup>1)</sup>	k.A.
Fischmehl <sup>2)</sup>	5 %
Fischöl, -Lebertran <sup>2)</sup>	1 %

[<sup>1)</sup> durch die TLL in Zusammenarbeit mit BLE getestet <sup>2)</sup> Quelle: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft: Verordnung (EG) Nr. 2263/2000 DER KOMMISSION vom 13.10.2000 zur Änderung des Anhanges I der Verordnung (EWG) Nr. 2658/87 des Rates über die zolltarifliche und statistische Nomenklatur und den gemeinsamen Zolltarif, Anhang 8: Waren, für die Ernährung ungenießbar gemacht (Liste der Vergällungsmittel); eigene Untersuchungen]

### 2.2.3. Pelletierung von Halmgut

Die Kompaktierung von halmgutartigen Biomassen ist im Wesentlichen aus Gründen der Erhöhung der Energiedichte, der Homogenität der Brennstoffe sowie verbesserter Transport- und Lagerungseigenschaften erforderlich. Die Verdichtung von Stroh bzw. Ganzpflanzengetreide mit Hilfe von Ballenpressen (Hochdruck-, Rund- und Quaderballen) für die energetische Verwertung ist in der Landwirtschaft Stand der Technik. Für den Einsatz biogener Halmgutbrennstoffe in Kleinf Feuerungsanlagen (z. B. Muldenfeuerung, Einschub- bzw. Unterschubfeuerung), welche mit einer automatischen Brennstoffbeschickung arbeiten, kommen bevorzugt Pellets in Frage. Dabei ist für halmgutartige Pellets (Stroh-, Ganzpflanzen- und Grüngutpellets), aufgrund der rechtlichen Rahmenbedingungen, besonders der Bereich zwischen 15 kW<sub>th</sub> und 100 kW<sub>th</sub> relevant. Die energetische Nutzung derartiger Brennstoffe erfolgt gegenwärtig jedoch fast ausschließlich für Versuchszwecke bzw. im Kleinmaßstab. In der Landwirtschaft wird gegenwärtig die Pelletierung von Halmgut hauptsächlich zur Herstellung von Futterpellets und Einstreu angewandt, die sich jedoch nur bedingt für eine energetische Verwertung eignen. Sie sind besonders durch hohe Abriebwerte und niedrige Ascheschmelzpunkte gekennzeichnet (s. Kap. 2.1.). Die Verbesserung dieser beiden Parameter wurde deshalb schwerpunktmäßig untersucht.

Im Hinblick auf den Einsatz von Zusatzstoffen bei der Pelletierung von Brennstoffen für Kleinf Feuerungsanlagen (< 100 kW<sub>th</sub>) sind die Vorschriften der 1.BImSchV mit den danach

zulässigen Zuschlagstoffen zu beachten. Diese stehen teilweise im Widerspruch zu den für Holzpellets vorgegebenen Normen /16/. Die 1. BImSchV regelt im § 3 die zugelassenen Brennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen. Danach werden im Absatz 4 Presslinge (Pellets) oder Briketts, die unter Verwendung von Bindemitteln außer Stärke, pflanzlichen Paraffin sowie Melasse hergestellt wurden, von der energetischen Verwertung im Geltungsbereich der Verordnung ausgeschlossen. In der DIN 51731 sind keine Bindemittel für die Pelletierung zugelassen. Dagegen ermöglicht die ÖNORM M 7135 und das daran angelehnte Zertifizierungsprogramm DIN *p/us* eine Zugabe von bis zu 2 % Presshilfsmittel. Dabei wird explizit auf die Verwendung chemisch unveränderter Produkte aus der primären land- und forstwirtschaftlichen Biomasse hingewiesen. Hier sind z. B. Maisschrot, Maisstärke und Roggenmehl aufgeführt, wenn sie der Erleichterung des Pressvorganges und damit der Verbesserung der Energiebilanz sowie zur Erhöhung der Abriebfestigkeit dienen.

In der Regel werden von den Herstellern von Pellets aus land- und forstwirtschaftlicher Biomasse keine Bindemittel eingesetzt /17/. Die Konditionierung der Biomassen erfolgt über ausgewählte Druck-, Wasser/Dampfanteil- und Temperaturregulierungen.

Trotz der dargestellten rechtlichen bzw. normbedingten Einschränkung möglicher Zusatzstoffe wurden im Projekt u. a. mineralische Zusätze bzw. auch höhere Konzentrationen (> 2 %) auf ihren möglichen Einfluss zur Erhöhung des Ascheschmelzpunktes und weitere Presshilfsmittel zur Minimierung der Abriebfestigkeit von Halmgutpellets sowie Kombinationen aus beiden untersucht. Dabei konnte auch auf Erfahrungen anderer Forschungseinrichtungen aus Deutschland, Österreich und Dänemark zurückgegriffen werden /18/, /19/, /20/, /21/. Für die großtechnischen Verbrennungsversuche kamen Winterweizen- und Winterroggenstroh sowie Triticaleganzpflanze zum Einsatz. Die Versuche erfolgten bei der Pelletier- und Transportgesellschaft mbH (PTG) in Apolda, da hier die technologischen Voraussetzungen für die Zumischung von Zusätzen gegeben sind. Ausgehend von den Untersuchungsergebnissen im Labormaßstab wurden als Korrekturkomponenten Tonmehl in einer Größenordnung von 3 % und 2 % Melasse als Bindemittel eingesetzt (s. Tab. 2). Zum Einsatz kam eine Ringmatrizenpresse mit einer Matrizenlochung von 6 mm bzw. 8 mm, wobei angemerkt werden muss, dass mit der 8 mm Matrize schon größere Mengen pelletiert wurden, was zu Durchmessern größer der angestrebten 8 mm führte.

Im Kapitel 2.1 sind bereits die Ergebnisse der Inhaltsstoffe der modifizierten Halmgutpelletchargen dargestellt und diskutiert. Deshalb soll an dieser Stelle ausschließlich auf die Ergebnisse zur Veränderung des Ascheschmelzverhaltens eingegangen werden.

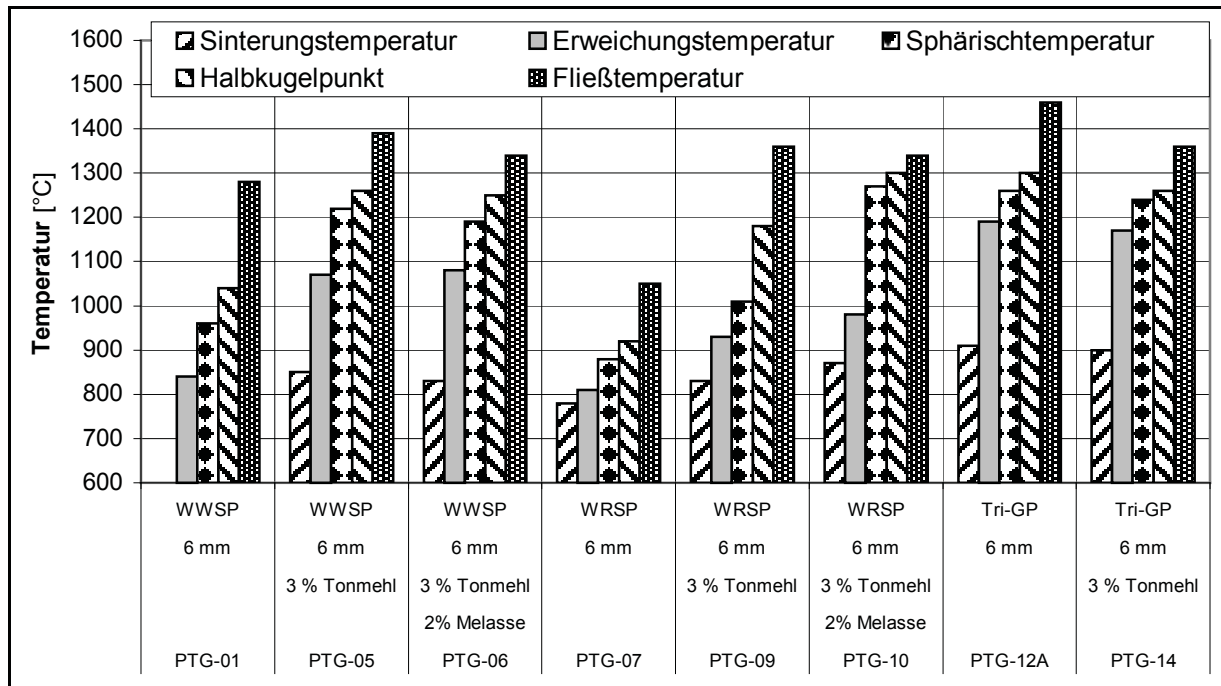


Abbildung 11: Vergleich der Ascheschmelzpunkte der modifizierten Energiehalmgutpellets (Ergebnisse der Praxispelletierung der PTG, Apolda; Analyse des Ascheschmelzverhaltens durch DBI-AUA, Freiberg)

Die Modifizierung der Winterweizen- und Winterroggenstrophpellets (WWSP/WRSP) mit Tonmehl führte zu einer signifikanten Erhöhung der Ascheschmelzpunkte (s. Abb. 11). Besonders deutlich wird das bei den um 230 bzw. 120 Grad erhöhten Erweichungstemperaturen. Der Einsatz von weiteren, in Bezug auf den Abrieb eingesetzten, Zuschlagstoffen zeigt kaum einen Einfluss auf die Schmelztemperaturen. Bei Triticaleganzpflanzenpellets (Tri-GP) konnte kein Effekt erzielt werden. Allerdings liegen die Ascheschmelzpunkte ohnehin auf einem, den modifizierten Strophpellets entsprechenden, höheren Temperaturniveau

### 2.3. Teilziel 1c - Zusammenstellung von Anlagen zur Verbrennung halmgutartiger Brennstoffe

Schwerpunkt der Arbeiten zum Teilziel 1c bildete eine Herstellerbefragung, um festzustellen, ob Anlagen am Markt angeboten werden, die für eine thermische Verwertung von Getreide, Halmgutpellets oder Mischungen dieser Brennstoffe mit holzartigen Brennstoffen geeignet sind. Zu diesem Zwecke wurden auf Basis der Datenbank des TZNR der TLL 178 Anschreiben inkl. Fragebogen in neun europäische Länder versandt (s. Anhang 1). Diese setzen sich im Wesentlichen aus 86 deutschen, 44 dänischen und 36 österreichischen Unternehmen zusammen. Der Rest entfällt auf Unternehmen aus der Schweiz, Italien, Schweden, Finnland, Großbritannien und der Tschechischen Republik. Abzüglich der nicht zustellbaren Sendungen bzw. inzwischen insolventer Firmen wird von einer Gesamtzahl von 166 Befragten ausgegangen. Leider betrug der Rücklauf nur 23 %. Während von 35 auswertbaren österreichischen Firmen 14 und somit 40 % bzw. 2 von 6 Schweizer Firmen (33 %) antworteten, lag die Rücklaufquote der deutschen Hersteller bei lediglich 19 % (16 von 85) bzw. 15 % (6 von 41) bei den dänischen Herstellern. Aus den restlichen Ländern, welche analog Dänemark in englischen Sprache angeschrieben wurden, gab es keine Rückantworten. Die Ergebnisse der Umfrage sind in den Tabellen 10 (Getreidekörner) und 11 (Stroh) zusammengefasst, geordnet nach Ländern, Leistungsbereichen und Verbrennungsprinzipien. Es sind zusätzlich die nach der Umfrage bekannt gewordenen Hersteller aufgeführt, um einen möglichst vollständigen Überblick europäischer Anbieter zu gewährleisten.

Betrachtet man die Anzahl der Anbieter nach drei Leistungsklassen ( $P_{th}$ ), unterschieden nach den rechtlichen und emissionsseitigen Anforderungen für:

- |  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| 1. $15 \text{ kW}_{th} \leq P_{th} < 100 \text{ kW}_{th}$    | 1. BImSchV, genehmigungsfrei      |
| 2. $100 \text{ kW}_{th} \leq P_{th} < 1.000 \text{ kW}_{th}$ | 4. BImSchV, genehmigungspflichtig |
| 3. $P_{th} \geq 1.000 \text{ kW}_{th}$                       | 4. BImSchV, genehmigungspflichtig |

wird deutlich, dass es europaweit wenigstens 15 Anbieter für getreidetaugliche Feuerungsanlagen im Leistungsbereich kleiner  $100 \text{ kW}_{th}$  gibt. Für Anlagen im mittleren Leistungsbereich sind dreizehn und für Anlagen größer  $1.000 \text{ kW}_{th}$  sieben Anbieter auf dem Markt. Bei Herstellern von halmgut-tauglichen Anlagen gibt es ein ausgeglichenes Verhältnis von durchschnittlich zwölf Anbietern je Leistungsbereich (1.: zwölf, 2.: dreizehn, 3.: elf). Im Rahmen des Projektes wurden zu einigen dieser Hersteller intensive Kontakte aufgenommen.

Tabelle 10: Übersicht der Hersteller von Getreidefeuerungsanlagen

Hersteller	Land	Feuerungsprinzip	Leistung [kW <sub>th</sub> ]
Agriservice	Deutschland	Unterschubfeuerung	12 bis 25
Agroflamm	Deutschland	Unterschubfeuerung	40
Ferro (baugleich Passat)	Deutschland	Einschub-, Muldenfeuerung	8 bis 158
Lambion	Deutschland	Unterschub-, Rostfeuerung	ab 100
Lopper	Deutschland	Rostfeuerung	50 bis 500
Oschatz Anlagenbau	Deutschland	Rostfeuerung	ab 1.000
Ökotherm	Deutschland	Vorofen-, Muldenfeuerung	10 bis 800
Biokompakt	Österreich	Unterschubfeuerung	25 bis 100
Fröling	Österreich	Rostfeuerung	bis 100
Guntamatic	Österreich	Rostfeuerung	7 bis 25
Pelletheiztechnik	Österreich	Unterschubfeuerung	14 bis 40
Polytechnik	Österreich	Unterschub-, Rostfeuerung	500 bis 15.000
Schmid	Schweiz	Rostfeuerung	300 bis 1.600
Baxi	Dänemark	Einschub-, Muldenfeuerung	23 bis 37
Bioner	Dänemark	Rostfeuerung	ab 5.000
CN Maskinfabriken	Dänemark	Vorofenfeuerung	15 bis 120
Euro Therm	Dänemark	Rostfeuerung	500 bis 10.000
Primdal & Haugesen	Dänemark	Einschub-, Muldenfeuerung	12 bis 47
Pilevang	Dänemark	Einschub-, Muldenfeuerung	20 bis 55
Refo	Dänemark	Einschub-, Muldenfeuerung	10 bis 37
Reka	Dänemark	Rostfeuerung	10 bis 6.500
Twin Heat	Dänemark	Einschub-, Muldenfeuerung	5 bis 70
Weiss	Dänemark	Rostfeuerung	2.000 bis 10.000

Tabelle 11: Übersicht der Hersteller von Strohfeuerungsanlagen

Hersteller	Land	Feuerungsprinzip	Aufbereitungsform		Leistung [kW <sub>th</sub> ]
			Pellet	Häcksel/Ballen	
Agroflamm	D	Unterschubfeuerung	X		40
Ferro	D	Einschub-, Muldenfeuerung	X		35 bis 1.000
Herlt	D	Ganzballenvergaser		X	85 bis 400
Lambion	D	Unterschub-, Rostfeuerung	X	X	ab 150
Lopper	D	Rostfeuerung	X	X	50 bis 500
Oschatz Anlagenbau	D	Rostfeuerung	X	X	ab 1.000
Ökotherm	D	Vorofen-, Muldenfeuerung	X		10 bis 800
Kohlbach	A	Ballenteiler-Einschubfeuerung		X	ab 1.000
Ökofen	A	? (Markteinführung ca. 2007)	X		10 bis 30
Pelletheiztechnik	A	Unterschubfeuerung	X		14 bis 40
Alcon	DK	Ganzballenvergaser		X	130 bis 650
Babcock Wilcox Volund	DK	Rostfeuerung/Zigarrenabbrand		X	ab 3.000
Bioner	DK	Rostfeuerung	X	X	ab 5.000
CN Maskinfabriken	DK	Vorofenfeuerung	X	X	15 bis 120
Danstoker	DK	Rostfeuerung	X	X	70 bis 20.000
Euro Therm	DK	Rostfeuerung	X	X	500 bis 10.000
Inventor	DK	Rostfeuerung		X	1.600 bis 4.500
Kem	DK	Rostfeuerung	X	X	ab 1.000
K. F. Halmfyr	DK	Ganzballenvergaser		X	570
Linka	DK	Ballenteiler-Einschubfeuerung		X	70 bis 10.000
Overdahl	DK	Ganzballenvergaser		X	12 bis 144
Reka	DK	Rostfeuerung	X	X	10 bis 6.500
Weiss	DK	Rostfeuerung	X	X	2 bis 10.000

Interessant sind die Aussagen der Kesselhersteller auf Fragen nach Hemmnissen für eine breitere energetische Verwertung von Getreidekörnern und Halmgutpellets als Brennstoff. Über ein Drittel der Hersteller (37 %) sieht in den gesetzlichen Rahmenbedingungen das wesentliche Hindernis für eine verstärkte energetische Nutzung dieser Brennstoffe. 29 % der Hersteller äußerten ethische Bedenken gegenüber der thermischen Nutzung von Getreidekörnern, 26 % sind der Meinung, dass die benötigte Anlagentechnik zu aufwendig für Kleinfeuerungsanlagen ist und 18 % sehen keine aussichtsreichen Marktchancen in diesem Segment. Als mögliche Maßnahmen für eine stärkere Verwendung der genannten Brennstoffe befürworten 32 % ein Markteinführungsprogramm, 21 % wünschen sich gesetzliche Übergangsfristen den Immissionsschutz betreffend.

## **2.4. Teilziel 1d - Verbrennungsversuche zur Emissionsmessung unter Prüfstands- und Praxisbedingungen**

Gegenwärtig gibt es in Europa mehr als 30 verschiedene Anbieter von Verbrennungsanlagen für Getreidekörner und Halmgutpellets (s. Kap. 2.3). Die Anlagen unterscheiden sich neben dem Leistungsbereich in Techniken zur Mono- bzw. Mitverbrennung in Kombinationen mit Holzhackschnitzeln und/oder Holzpellets bzw. Scheitholz. Nach den vorliegenden Ergebnissen bisheriger Emissionsmessungen werden die sehr unterschiedlichen Qualitäten des Ausbrandes bzw. weiterer Emissionsparameter deutlich (s. Tab. 12). Diese sind nur eingeschränkt vergleichbar und lassen lediglich eine grobe Einschätzung der Eignung dieser Kessel zu. Neben den in Deutschland durchgeführten Messungen, existieren zahlreiche Untersuchungsberichte des Dänischen Technologischen Institutes (s. Anhang 2). Diese sind allerdings nur bedingt verfügbar und fast ausschließlich in dänischer Sprache verfasst. Es wird deutlich, dass die Datengrundlage gerade hinsichtlich der Anlagenvielfalt als auch in Bezug auf bestimmte emissionsrelevante Parameter nur ungenügend für eine umfassende Einschätzung der Eignung der energetischen Verwertung von Getreide und Halmgutpellets ist.

Die meisten Anlagenhersteller gibt es in Dänemark. Hier ist der Einsatz von Getreide als Brennstoff für Anlagen bis zu 250 kW<sub>th</sub> Feuerungswärmeleistung möglich. Ausgewählte Anlagen werden in anderen europäischen Ländern unter eigenen Markennamen geführt, wobei die gleiche Anlagenbauweise vorliegt (z. B. Passat/Ferro oder Baxi/Föbi). Da die gesetzlich geforderten Emissionsgrenzwerte für derartige Anlagen in Dänemark und Österreich von denen in Deutschland teilweise abweichen, muss überprüft werden, ob diese Anlagen den Anforderungen der 1. BImSchV bzw. der TA Luft genügen.

Alle in Deutschland angebotenen Anlagen können mit mindestens einem Komplementärbrennstoff (Holzpellets und/oder Holzhackschnitzel bzw. Scheitholz) betrieben werden.

Bei der Auswahl für die im Projekt zu untersuchenden Anlagen wurden zeitgleich bearbeitete Projekte und Untersuchungen in anderen Bundesländern berücksichtigt. Die Firma WVT Wirtschaftliche Verbrennungs-Technik GmbH aus Overath-Untereschbach arbeitet beispielsweise mit ihrem neu entwickelten Feuerungskonzept zum alternativen Einsatz von Holzpellets bzw. Getreidekörnern mit dem Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum Nachwachsende Rohstoffe, Straubing, zusammen. Hier befindet sich ein Projekt zu Korrosionsuntersuchungen in Planung. Getreidefeuerungsanlagen der Firma Gerlinger sind in Österreich untersucht wurden. Weitere Feuerungsanlagen werden gegenwärtig in zahlreichen neuen Projekten untersucht und von der FNR e. V. unterstützt.

Tabelle 12: Zusammenfassung bundesweiter Ergebnisse von Emissionsuntersuchungen an Kleinfeuerungsanlagen bei Einsatz von Getreide bzw. Halmgutpellets

Brennstoff	Kessel	Leistung	CO	Staub	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	Gesamt-C	HCl	PAK	PCDD/F
		[kW <sub>th</sub> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[µg/m <sup>3</sup> ]	[ng TE/m <sup>3</sup> ]
Getreidekörner										
Roggen	Passat C4 /22/	36	1629	100	824					
	BAXI Multi Heat 4,0 /22/	43	87							
	RanHeat /22/	70	852		202					
	Ökotherm CO 49 /23/	49	153	108	581		11	46		
Weizen	Passat C4 /22/	36	1264	200	826					
	BAXI Multi Heat 4,0/22/	43	1064		781					
	Ökotherm CO 49 /23/	49	318	248	621			64		
	Ökotherm CO 49 /15/	49	32	203	714	237	2	10		
Weizen markiert (E 133)	Ökotherm CO 49 /15/	49	25	240	726	178	2	9		
Weizen markiert (dispers BASF)	Ökotherm CO 49 /15/	49	28	210	694	250		6		
Gerste	BAXI Multi Heat 4,0 /22/	43	40							
	Passat C4 /22/	36	1372	110	826					
Triticale	Ökotherm CO 49 /24/	49		210	540					
	Heizomat HSK Ra 50/25/	50	12	230	541 (NO)					
Halmgutpellets										
Getreidereinigungsabfälle - Pellets	Passat C4 /22/	36	905		657					
	BAXI Multi Heat 4,0 /22/	43	157	220						
Weizenstrohpellets (naturbelassen)	Ökotherm CO 49 /19/	49	275	65	279	58	3	5		
Weizenstrohpellets (naturbelassen)	Ferro Biomat FB 23L /19/	23	1186	156	130	92		1		
Triticalestrohpellets	Ökotherm CO 49 /24/	49	78	200	185		1			
Heupellets	Ökotherm CO 49 /24/	49	1850		206		23			
Mischungen										
90 %Triticale-Strohpellets / 10 % Kleie	Ökotherm CO 49 /24/	49	116		326		9			
80 % Triticale-Strohpellets / 20 % Kleie	Ökotherm CO 49 /24/	49	119	181	200		5			
50 % Holzpellets / 50 % Weizen	Ökotherm CO 49 /23/	49	370	106	463		79	65		
70 % Hackschnitzel / 30 % Roggen, Triticale	Heizomat HSK Ra 50 /23/	50	60	56	164	54		2	15	< 0,02
35 % Hackschnitzel / 65 % Roggen, Triticale	Heizomat HSK Ra 50 /23/	50	32	74	219	90		5	25	< 0,02

alle Angaben bezogen auf trockenes Abgas, 273 K, 1013 hPa, 13 Vol.-% Sauerstoff



### 2.4.1 Beschreibung der untersuchten Biomassefeuerungsanlagen

Das Institut für Energetik und Umwelt konzentrierte sich auf die Untersuchungen unter Prüfstandsbedingungen an zwei Anlagen im Leistungsbereich von ca. 20 kW<sub>th</sub>. Die TLL führte in Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner TLUG Untersuchungen an drei Praxisanlagen unterschiedlicher Leistungsbereiche durch. Die Auswahl der zu prüfenden Feuerungsanlagentypen erfolgte unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. In Abstimmung mit den Projektpartnern wurden die für Getreide und halmgutartige Brennstoffe geeignetsten bzw. erfolgversprechendsten Anlagen ermittelt.

#### 1. Prüfstandsuntersuchungen des IE

- BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO Wärmetechnik GmbH; Schwabach, Deutschland
- HKRST-FSK 20, Fa. Maskinfabriken REKA A/S; Aars, Dänemark

#### 2. Praxisuntersuchungen der TLL/TLUG

- MULTI HEAT Model 2,5; Fa. BAXI A/S, Dänemark
- Kesseltyp TVB Nr. 5 (M900); Fa. Ökotherm GmbH, Hirschau, Deutschland
- AGRO 40; Fa. Agroflam Feuerungstechnik; Overath-Untereschbach, Deutschland

#### Beschreibung der untersuchten Feuerungsanlagen

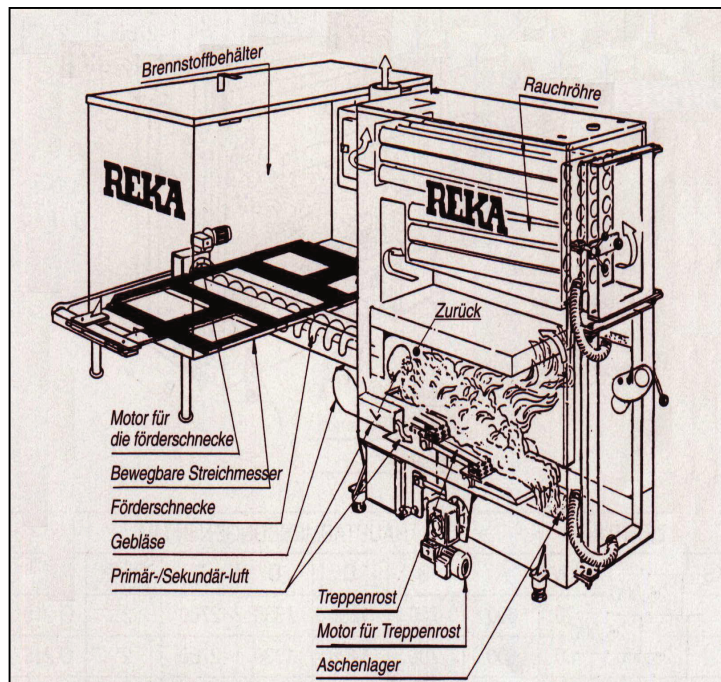
Die im IE vorhandene Anlage vom Typ FERRO BIOMAT FB 23L (s. Abb. 12) hat eine Nennwärmeleistung von 23 kW<sub>th</sub> bei Einsatz von Holzpellets (Getreide: 19 kW<sub>th</sub>) und wird ausschließlich für feuerungstechnische Untersuchungen genutzt. Ein mittels Motor angetriebenes



Schubsystem (Schubrostfeuerung) fördert den Brennstoff aus dem Magazin in den Brennraum. Die erforderliche Verbrennungsluft wird in Primär- und Sekundärluft aufgeteilt. Die Zufuhr der Primärluft erfolgt durch Düsen direkt in das Glutbett, die Sekundärluft wird von der Rückseite des Brennraumes eingeblasen. Über die Mikroprozessor-Steuerung der Kesselanlage wird die Verbrennungsluftmenge durch eine Drehzahlregelung des Gebläses an den tatsächlichen Bedarf angepasst. Die bei der Verbrennung anfallende Asche wird durch die Brennstoffnachführung automatisch in den Aschekasten geschoben. Die heißen Abgase aus dem Verbrennungsprozess umströmen die Heizflächen und geben die Wärmeenergie an das wassergefüllte Heizsystem ab.

Abbildung 12: FERRO BIOMAT FB 23L

Das Anlagenkonzept der REKA Feuerungsanlage vom Typ HKRST-FSK 20 (s. Abb. 13) mit einer Nennwärmeleistung von 20 kW<sub>th</sub> lies aufgrund dänischer Voruntersuchungen eine besonders gute Funktionsweise erwarten. Sie wurde vom "Dansk Teknologisk Institut" in Aarhus geprüft und ist durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) für holzartige Brennstoffe als förderfähig nach den Richtlinien des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie



(Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien, Bundesanzeiger Nr. 58 vom 23. März 2002, Seite 5.877) eingestuft. Die Verbrennungszone der Feuerungsanlage ist als beweglicher Treppenrost ausgeführt. Die Anlage verfügt über eine wassergekühlte und feuerfeste Auskleidung des Feuerungsraumes sowie einen halbautomatischen Ascheaustrag. Die erforderliche Verbrennungsluft wird gestuft als Primär- und Sekundärluft dem Treppenrost zugeführt.

Abbildung 13: REKA Anlage (Prinzipskizze)

Bei der unter Praxisbedingungen untersuchten Feuerungsanlage der Firma BAXI A/S- vom Typ MULTI HEAT 2,5, mit einer Nennwärmeleistung von 25 kW<sub>th</sub> für Holzpellets bzw. 23 kW<sub>th</sub> für Getreide handelt es sich um eine vom Hersteller für Getreide, Holzpellets und Holzhackschnitzel als geeignet ausgewiesene Muldenfeuerung (s. Abb. 14). Allerdings ist dieser Anlagentyp nur bei

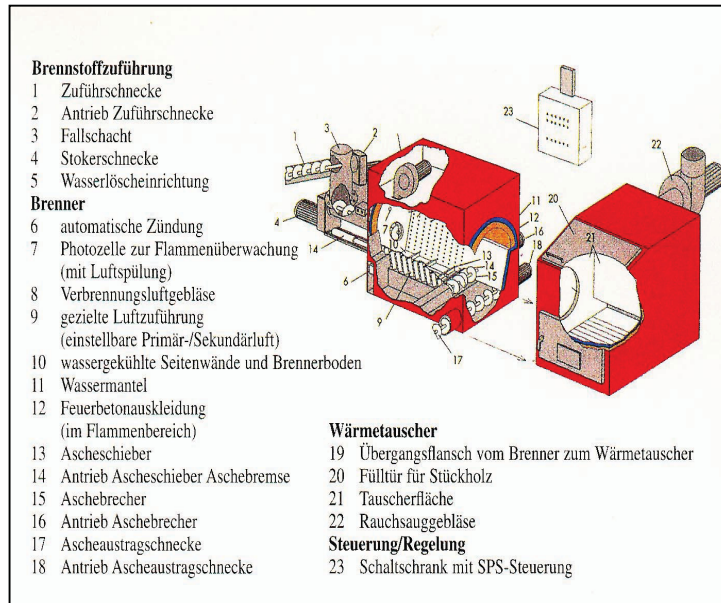


entsprechender Modifizierung der Brennstoffzuführung und der Umstellung der Steuerung für Getreide und Holzhackschnitzel geeignet. Die für den Einsatz von Getreide vom Hersteller empfohlene Schneckenverlängerung der Brennstoffzuführschnecke soll Problemen entgegenwirken, die durch Schlackebildung in der Brennkammer entstehen können. Das beim Einsatz von Holzhackschnitzeln zu installierende Rührwerk soll eine etwaige Brückenbildung des Brennstoffes im Vorratsbehälter verhindern.

Abbildung 14: BAXI Anlage (Prinzipskizze)

Als vom Hersteller besonders geeignete Getreidearten werden Weizen und Gerste mit einem Wassergehalt von 15 % angegeben. Die untersuchte Anlage verfügt über keine automatische Zündung und Entaschung.

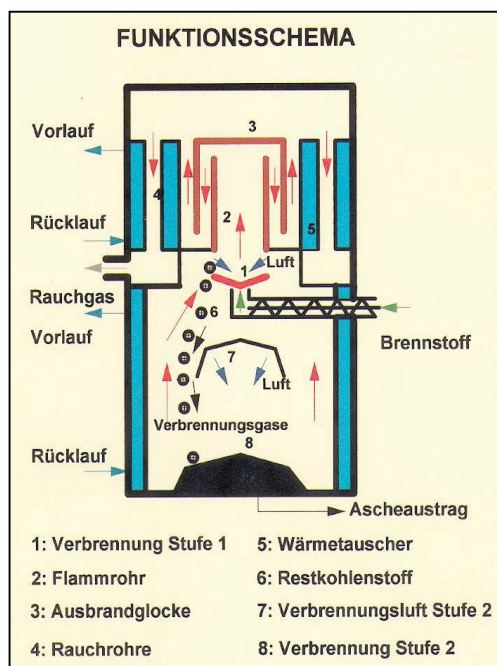
Am Standort Dornburg der TLL wurde die modifizierte Vorofen-Brennmulden-Feuerungsanlage (M 900) mit einer Nennwärmeleistung von 900 kW<sub>th</sub> der Firma Ökotherm-Projekt GmbH für Verbrennungsuntersuchungen unter Praxisbedingungen ausgewählt (s. Abb. 15). Zur Adaption der



Anlage an die veränderten Anforderungen der Monoverbrennung von Körner- bzw. Halmgutpelletchargen wurden in Absprache mit dem Anlagenhersteller Modifikationen im Bereich der Verbrennungsluftführung und des Ascheaustragssystems durchgeführt. Vor der Inbetriebnahme der umgestalteten Anlage wurden diese Arbeiten durch die Insolvenz der Firma Ökotherm-Projekt GmbH erheblich erschwert.

Abbildung 15: Ökotherm Vorofen-Brennmulden Feuerung (Prinzipskizze)

Für die Untersuchung der dritten Praxisanlage konnte mit dem Agro 40 der Firma Agroflam Feuerungstechnik GmbH ein speziell für Getreidekörner bzw. Halmgutpellets entwickelter Kessel am Thüringer Lehr-, Prüf- und Versuchsgut (TLPVG) in Buttstedt etabliert werden. Die Anlage mit



einer Nennwärmeleistung von 50 kW<sub>th</sub> für Holzpellets bzw. 40 kW<sub>th</sub> für Getreide basiert auf einem zweistufigen Verbrennungsprinzip. Während in der ersten Stufe die Trocknung, Vergasung sowie die Verbrennung der gasförmigen Bestandteile erfolgt, wird in einer zweiten Stufe, räumlich und zeitlich von der ersten Stufe getrennt, das verbliebene Kohlenstoffgerüst des jeweiligen Brennstoffes verbrannt (s. Abb. 16). Die Feuerungsanlage ist neben einer automatischen Brennstoffzufuhr mit einem automatischen Zündsystem sowie einem automatischen Ascheaustragsystem ausgerüstet.

Abbildung 16: AGRO 40 (Funktionsschema)

#### **2.4.2 Überblick der durchgeführten Emissionsmessungen**

Die in den einzelnen Feuerungsanlagen durchgeführten kontinuierlichen und diskontinuierlichen Emissionsmessungen sind in den Tabellen 13 und 14 dargestellt. Der Versuchsaufbau sowie die zur Anwendung gekommenen Messverfahren bzw. Analysen der diskontinuierlich bestimmten Emissionen sind in Anlage 1 Kapitel 2.3 (IE, Prüfstand) und Anhang 3 (TLL/TLUG, Feldmessung) aufgeführt.

Die Darstellung der Ergebnisse der durchgeführten Emissionsuntersuchungen sind Konzentrationsangaben bezogen auf 13 % Sauerstoffgehalt im Normzustand (273 K, 1013 hPa) des trockenen Abgases. Kontinuierlich gemessene Parameter sowie Staub sind in Anlehnung an die 1. BImSchV als Viertelstundenmittelwerte ausgewiesen. Die nach TA Luft diskontinuierlich bestimmten Parameter Staub und Chlorwasserstoff sind als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Sauerstoffgehalt im Normzustand (273 K, 1013 hPa) des trockenen Abgases dargestellt.

Die hier nicht diskutierten Abgaskomponenten Gesamtkohlenstoff (Ges.-C) und Distickstoffoxid (Lachgas,  $\text{N}_2\text{O}$ ) sind in Anlage 4, neben allen anderen Versuchsergebnissen, dargestellt.

Für die Verbrennungsversuche wurden für alle Anlagen Brennstoffe aus einer Charge verwendet. Lediglich bei der kurzfristig ins Projekt aufgenommenen Feuerungsanlage Agro 40 wurden die verwendeten Wintergersten- und Winterroggenkörner einer anderen Charge entnommen.





Tabelle 14: Übersicht der durchgeführten Feldmessungen (TLL/TLUG)

[illegible]

## 2.4.3 Ergebnisse

### 2.4.3.1 Kohlenmonoxid (CO)

Der in Bezug auf die Qualität des Ausbrandes und damit letztendlich auch für den Wirkungsgrad einer Anlage entscheidendste Parameter ist der Gehalt an Kohlenmonoxid im Rauchgas. Für Anlagen von mehr als 15 und kleiner 100 kW<sub>th</sub> gilt für Brennstoffe nach § 3 Abs. 1 Nr. 8 (Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe) 1.BImSchV ein Grenzwert von 4 g/m<sup>3</sup> unter Normbedingungen (d. h. 273 K, 1013 hPa), bezogen auf einen Volumengehalt an Sauerstoff im Abgas von 13 %. Für Brennstoffe nach § 3 Abs. 1 Nr. 4 bis 5a der 1.BImSchV (naturbelassenes (nicht)stückiges Holz, Holzpresslinge) gilt dieser Grenzwert für Anlagen bis 50 kW<sub>th</sub> (s. Tab. 15).

Tabelle 15: Grenzwerte für Holzfeuerungsanlagen für Brennstoffe nach § 3 Abs. 1 Nr. 4 bis 5a der 1. BImSchV

Nennwärmeleistung in kW	bis 50	über 50 bis 150	über 150 bis 500	ab 500
Massenkonzentration an CO in g/m <sup>3</sup>	4	2	1	0,5

Die untersuchten Feuerungsanlagen zeigen neben brennstoffbedingten, deutliche anlagen-spezifische Unterschiede bei den erreichbaren Niveaus an Kohlenmonoxid (s. Abb. 17 bis 22). Während die Versuche mit den holzartigen Referenzbrennstoffen Holzhackschnitzel und DIN-Holzpellets erwartungsgemäß zu guten bis sehr guten Ausbrandergebnissen bei allen Feuerungsanlagen führten, wurden bei der Verbrennung der halmgutartigen Brennstoffe Strohpellets, Getreidekörner bzw. -abgänge sowie Mischungen dieser mit Holzbrennstoffen sehr unterschiedliche Ergebnisse erzielt.

Generell gilt, dass bei den vom IE auf dem Prüfstand untersuchten Anlagen deutlich höhere Kohlenmonoxidgehalte festgestellt wurden, im Vergleich zu den von der TLL/TLUG untersuchten Praxisanlagen.

### Ferro

Die an der Ferro Anlage (s. Abb. 17) gemessenen Emissionswerte für Körnerchargen waren so unzureichend, dass weitere Messkampagnen an dieser Anlage als nicht sinnvoll erschienen und statt dessen die Versuche zur Prüfung der verschiedenen Halmgutpelletqualitäten am Reka Kessel vertieft wurden. Lediglich bei Gerstenkörnern konnten mit durchschnittlich 1.500 mg/m<sup>3</sup> Werte unter 4 g/m<sup>3</sup> sicher erreicht werden. Als Ursachen wurden vom IE Schwierigkeiten beim Eintrag des Brennstoffes in den Feuerraum sowie eine nur ungenügende Luftzuführung bzw. Luftverteilung angegeben.

Eine Mitverbrennung von Getreidekörnern mit DIN-Holzpellets (DIN-HP) führte zu einer deutlichen Verminderung der Kohlenmonoxidemissionen, die Zumischung von Getreidekörnern bis zu 30 % (Weizen, WW bzw. Roggen, WR) zu durchschnittlichen Ausbrandergebnissen von 101 bzw. 436 mg/m<sup>3</sup>. Maximalgehalte von bis zu 4.400 mg/m<sup>3</sup> bei der Zumischung von 50 % Roggenkörnern zeigen jedoch die Grenzen der Zumischung für diesen Feuerungsanlagentyp.

In Bezug auf die Verbrennung der Halmgutpellets kann festgestellt werden, dass der Grenzwert von 4 g/m<sup>3</sup> mit durchschnittlich ca. 800 mg/m<sup>3</sup> (minimal 219 und maximal 1.901 mg/m<sup>3</sup>) auch mit Einstreustrohpellets (Winterweizenstrohpellets, WWSP) sicher eingehalten werden kann.

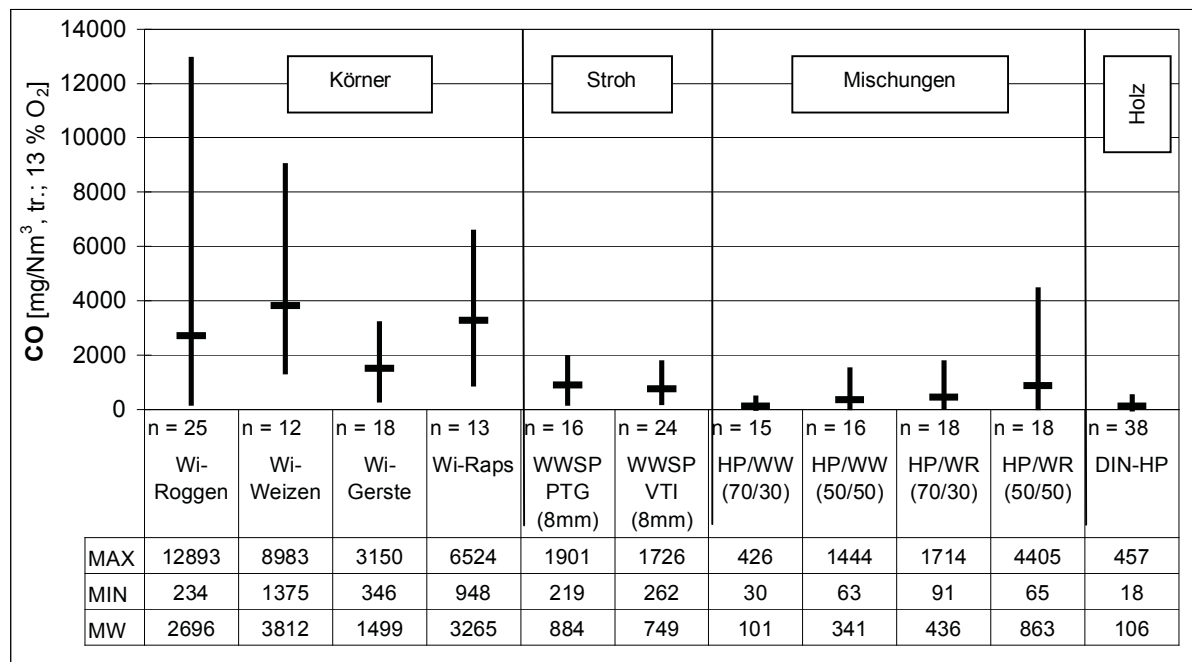


Abbildung 17: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

## Reka

Die Untersuchungen der Reka Anlage zeigen ähnliche Ergebnisse (s. Abb. 18). Hier ergaben die Messungen für die untersuchten Körnerchargen neben den größten Schwankungsbreiten auch die höchsten Durchschnittswerte. An dieser Anlage zeichnen sich ähnliche Vorteile bei der Verbrennung von Gerste ab wie bei der Ferro Anlage. Zusätzlich wurden hier Hafer- und Triticalekörner untersucht, welche Kohlenmonoxidgehalte kleiner 1.000 mg/m<sup>3</sup>, am Beispiel der Triticale sogar kleiner 100 mg/m<sup>3</sup>, aufwiesen.

Eine Mitverbrennung von Getreidekörnern mit Holzhackschnitzeln führte auch bei dieser Anlage zu einer deutlichen Verminderung der durchschnittlichen Kohlenmonoxidemissionen. Dabei lagen selbst bei Zumischung von 50 % Getreidekörner die maximal festgestellten Werte mit kleiner 800 mg/m<sup>3</sup> deutlich unter denen der Ferro Anlage. Vorteile ergeben sich bei beiden Anlagen durch die Zumischung von Weizenkörnern gegenüber Roggenkörnern.

Die Ergebnisse zeigen, dass diese Anlage besser für die Verbrennung von Halmgutpellets geeignet ist als die Ferro Anlage. Hier wurden maximale Emissionswerte für die Einstreupellets von 1.000 mg/m<sup>3</sup> festgestellt.



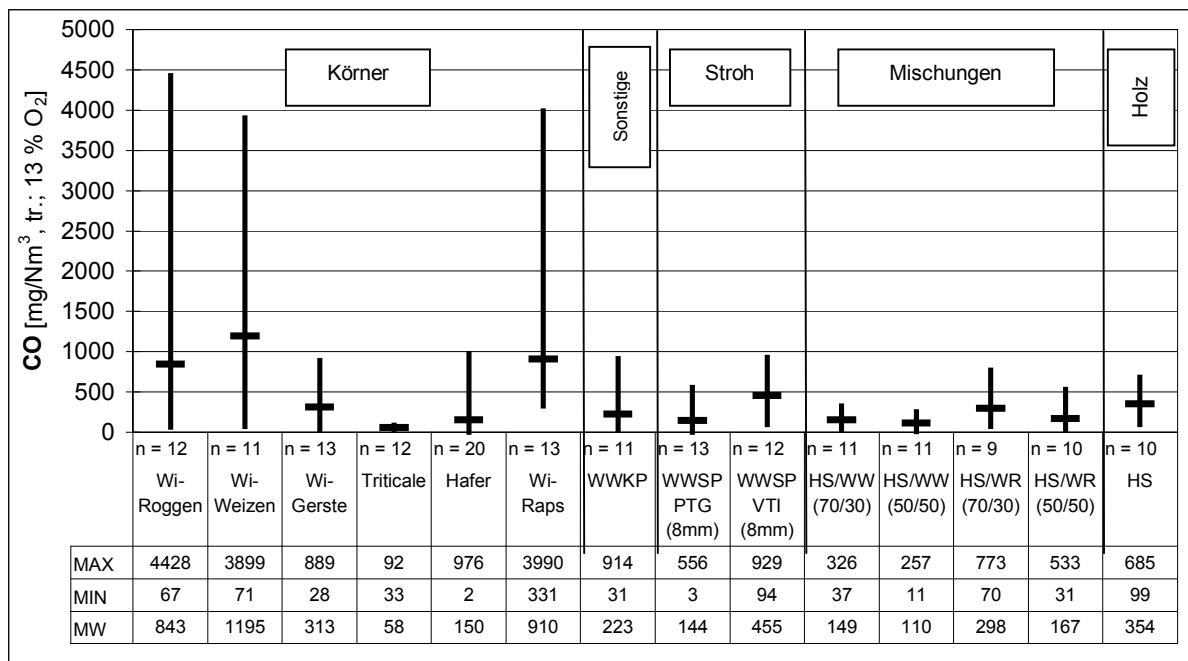


Abbildung 18: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Die Ergebnisse der zweiten Messkampagne mit den Halmgutpelletchargen bestätigen diese Feststellung und verdeutlichen zudem die ausbrandverbessernde Wirkung der Zuschlagstoffe (s. Abb. 19).

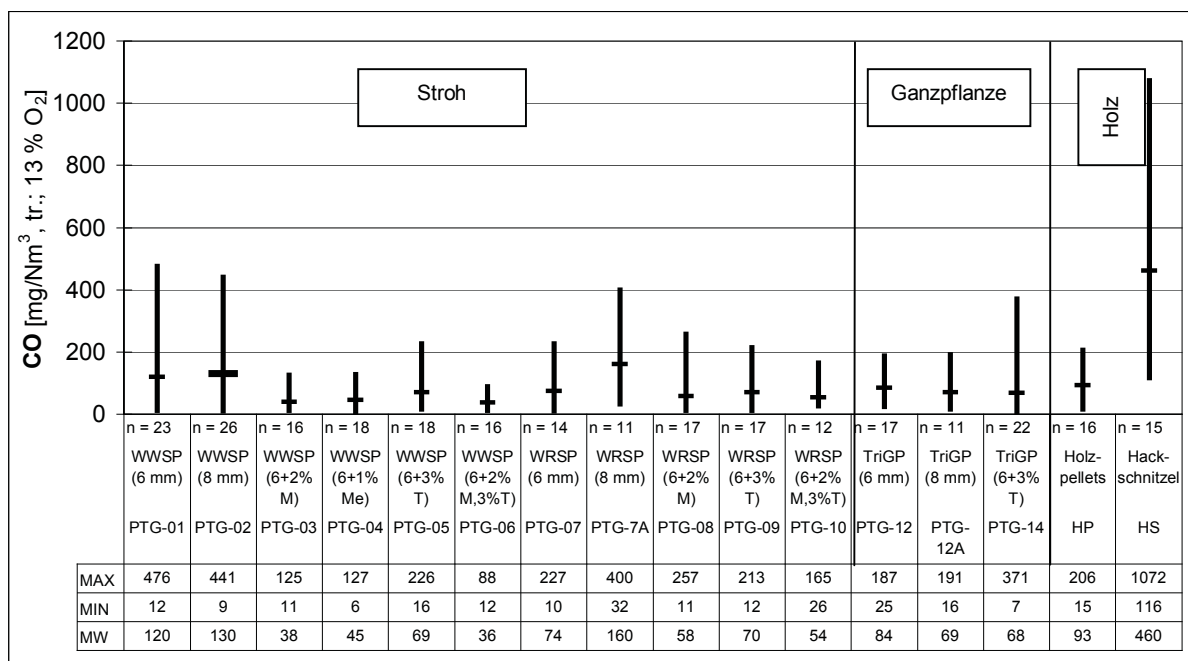


Abbildung 19: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomasse – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Die durchschnittlich festgestellten Mittelwerte der Halmgutpelletchargen lagen mit kleiner 100 mg/m<sup>3</sup> unterhalb des Bereiches des Referenzbrennstoffes Holzhackschnitzel. Bei den modifizierten Strohpellets konnten tendenziell geringere Schwankungsbreiten und niedrigere Kohlenmonoxidniveaus festgestellt werden als bei Einstreupellets.

In Bezug auf das Teillastverhalten muss festgestellt werden, dass die Reka Anlage für alle untersuchten Brennstoffe (s. Abb. 20) nicht geeignet ist.

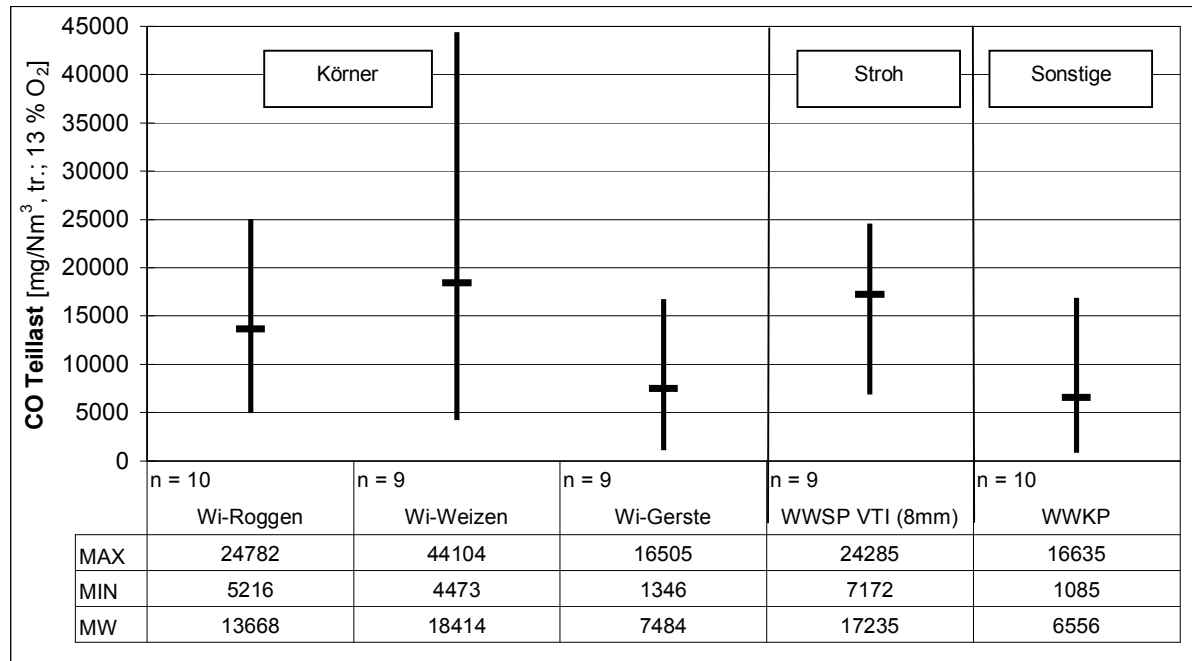


Abbildung 20: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen im Teillastbereich – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

## Baxi

Die Ergebnisse der Verbrennungsversuche an der Baxi Anlage verdeutlichen in Bezug auf die Körnerverbrennung eine weitere Verbesserung im Vergleich zur Reka Anlage. Die Mittelwerte der Kohlenmonoxidemissionen aller untersuchten Getreidekornchargen (s. Abb. 21) lagen mit kleiner 100 mg/m<sup>3</sup> sowie Maximalgehalten von 423 mg/m<sup>3</sup> auf einem deutlich niedrigeren Niveau und wiesen zudem geringere Schwankungsbreiten auf als vergleichbare Brennstoffe in den bereits dargestellten Prüfstandsuntersuchungen. Angemerkt werden muss, dass es besonders bei den eingesetzten Nacktgetreidearten, Halmgutpellets und den sonstigen landwirtschaftlichen Brennstoffarten zu nicht unwesentlichen Verschlackungen im Bereich des Feuerraumes gekommen ist, welche nur aufgrund einer manuellen Entnahme zu keiner Funktionsstörung der Anlage und damit verbundenen CO-Spitzen führten. Inwieweit mechanische Veränderungen des Brennstoffeintrag- bzw. Ascheaustragsystems zu positiven Effekten hinsichtlich der Minimierung der Schlackebildung beitragen, konnte bislang nicht geprüft werden.

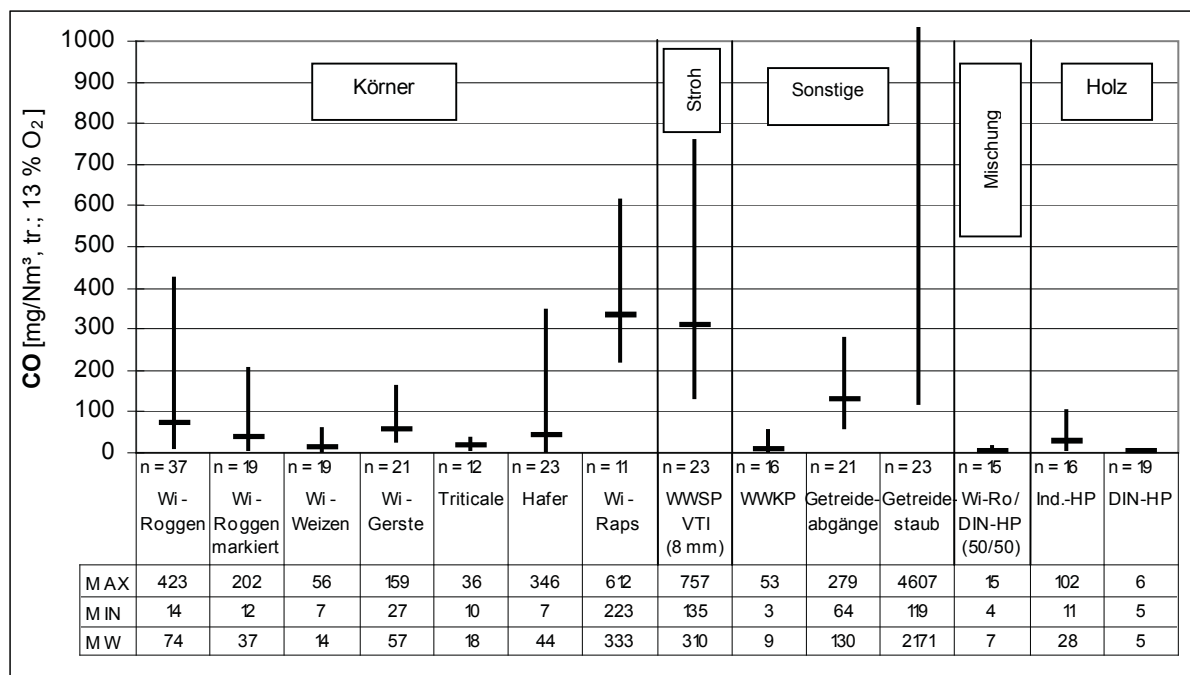


Abbildung 21: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Die einzig geprüfte Variante zur Mischung von Holzpellets mit Roggenkörnern (1:1) führte auch bei dieser Anlagentechnik zu einer deutlichen Verbesserung der Ausbrandergebnisse gegenüber der reinen Getreidevariante. Zudem wurde neben der Minimierung der Schlackeanteile, das bei den Getreidechargen festgestellte sehr träge Zündverhalten wesentlich verbessert. Rapskörner, welche nach Eintrag in den Feuerraum aufgrund einer schnellen Ölfreisetzung explosionsartig verbrennen, weisen neben einem höheren CO-Niveau auch einen deutlich unruhigeren Verbrennungsverlauf auf als die anderen eingesetzten Brennstoffe (s. Anlage 3).

Der Einsatz von Winterweizeneinstreustrohpellets (WWSP) führt, mit Ausnahme des untersuchten Getreidestaubes, zu deutlich höheren Konzentrationen und Schwankungsbreiten hinsichtlich der CO-Emissionen als alle anderen untersuchten Brennstoffe, erfüllt aber die rechtlichen Anforderungen. Aufgrund hoher Asche- und Schlackeanteile sind diese Pelletqualitäten an dieser Anlage nur im quasikontinuierlichem Betrieb einsetzbar.

Die weiterhin untersuchten Brennstoffe Winterweizenkleiepellets (WWKP) und Industrieholzpellets (Ind.-HP) zeigen hinsichtlich des Ausbrandes gute Ergebnisse mit Maximalwerten von 53 bzw. 102 mg/m³. Bei diesen beiden Brennstoffen muss jedoch besonders auf die Unterschiede beim Ascheanfall sowie der Verschlackungsneigung hingewiesen werden (s. Tab. 16).

Während der Gesamtaschegehalt (Aschegehalt plus Schlackengehalt) bei WWKP bei 7,95 % lag und der Schlackeanteil daran 40 % betrug, lag der Gesamtaschegehalt der Industrieholzpellets lediglich bei 0,90 % und der Schlackeanteil davon bei 11 %.

Tabelle 16: Vergleich der Asche- und Schlackeanteile ausgewählter biogener Festbrennstoffe (Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S – 2003/04)

Brennstoff	Aschegehalt	Schlackegehalt
	in m – % vom Brennstoff	
DIN-Holzpellets	0,93	0,00
Industrieholzpellets	0,80	0,10
Winterweizenkleipellets - WWKP	4,77	3,18
Winterweizeneinstreusstrophpellets - WWSP	2,67	0,67
Winterroggen	0,99	0,81
Wintergerste	2,08	0,31

## Agroflamm

Die erste in Deutschland speziell für den Einsatz von Stroh- und Grüngutpellets sowie Getreidekörnern entwickelte Kleinfeuerungsanlage weist kaum zu verbessernde Ausbrandergebnisse auf (s. Abb. 22). Die Kohlenmonoxidkonzentrationen für alle untersuchte Getreidekörnerchargen, auf die der Kessel jeweils individuell eingestellt werden muss, liegen mit deutlich kleiner 50 mg/m<sup>3</sup> teilweise unter den Werten, welche mit dem Referenzbrennstoff Holzpellets zu erreichen sind. Es sind bei entsprechend vorgenommener individueller Getreidekörneinstellung keine signifikanten Brennstoffunterschiede feststellbar.

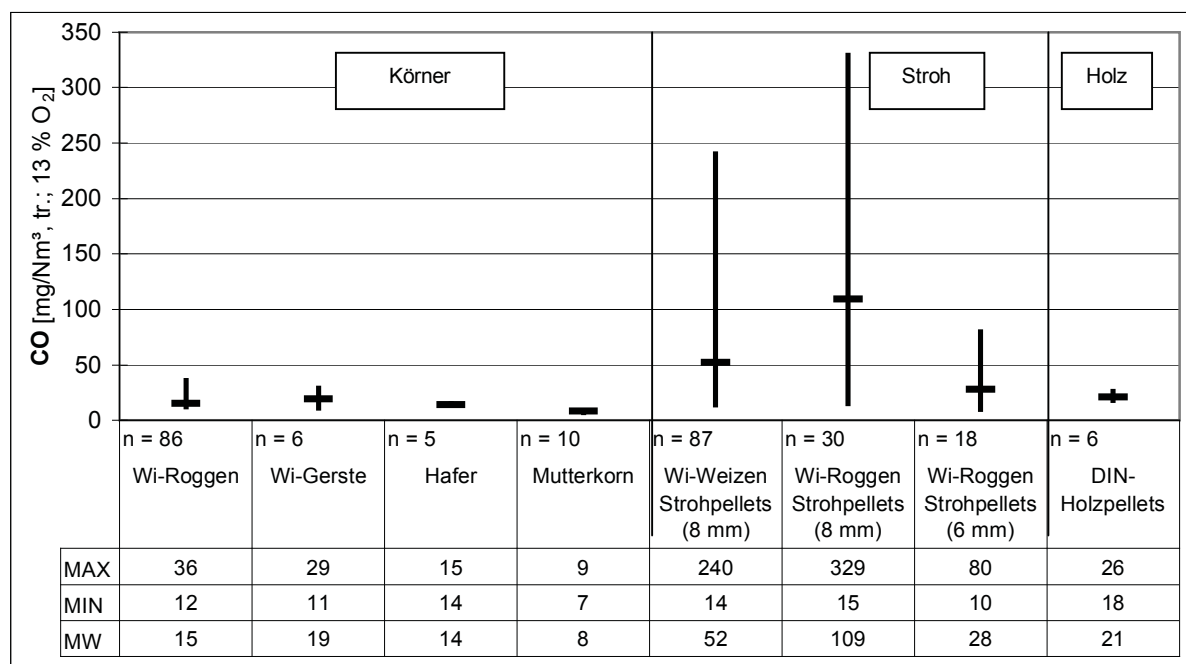


Abbildung 22: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflamm – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

In Bezug auf die Verwertung von Halmgutpellets kann festgestellt werden, dass bei individueller Einstellung für die eingesetzte Strohart und den jeweiligen Pelletdurchmesser die mit Abstand besten Ergebnisse für nicht mit Zuschlagstoffen versehene Strophpellets erreicht wurden. Hier werden die geforderten Grenzwerte für Kohlenmonoxidkonzentrationen um ein Vielfaches unterschritten.

## Ökotherm Anlage

Aus früheren Untersuchungen an dieser Anlage war bekannt, dass es beim Einsatz von landwirtschaftlichen Haupt- und Nebenprodukten immer wieder zu Verschlackungen im Feuerraumbereich kommen kann, welche zu erheblichen Funktionsstörungen des Anlagenbetriebes führen. Die Feuerung wurde daher vom Hersteller für den Einsatz halmgutartiger Brennstoffe im Bereich der Luftzuführung und -verteilung sowie in Bezug auf das Ascheaustragssystem (Modifizierung des Ascheschiebers) umgerüstet. Die nach dem Umbau vorgenommenen Messungen der Kohlenmonoxidemissionen an der Vorofen-Brennmuldenfeuerung zeigen einen guten Ausbrand für Wintergerstenkörner bei gegenüber früheren Messungen gestiegenem Emissionsniveau für den Referenzbrennstoff Holzhackschnitzel (s. Abb. 23).

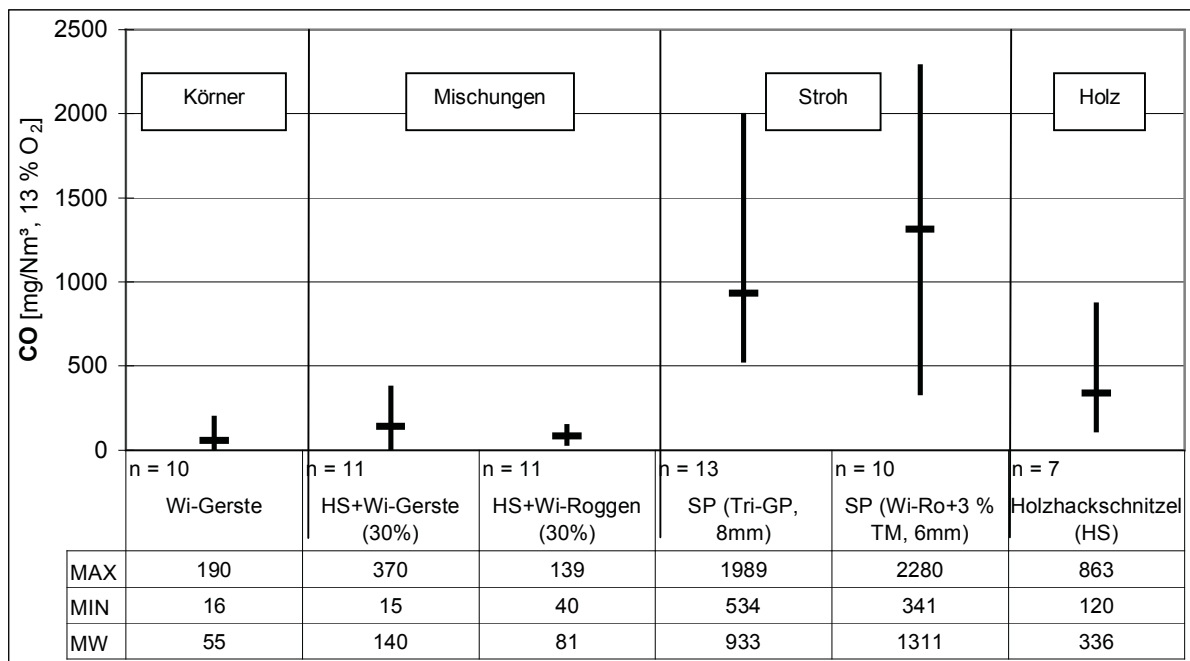


Abbildung 23: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am 900 kW Kessel, Fa. Ökotherm – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Die Mischung von Getreidekörnern mit Holzhackschnitzeln führte selbst bei Nacktgetreidearten, wie z. B. Roggenkörner, zu einer Verbesserung der Ausbrandergebnisse gegenüber dem Referenzbrennstoff trotz höherer Verschlackungsneigung.

Für die hinsichtlich des Ascheschmelzpunktes noch kritischer einzuordnenden Halmgutpellets musste festgestellt werden, dass weder Triticaleganzpflanzenpellets noch die mit 3 % Tonmehl versehenen Roggenstrohpellets für einen kontinuierlich störungsfreien Anlagenbetrieb geeignet waren. Letztgenannte bildeten zwar eine wesentlich porösere Schlacke, welche aber trotz der vorgenommenen mechanischen Modifizierungen am Ascheaustragssystem die Verklumpungen vor bzw. Anbackungen an den Feuerraumwänden nicht wesentlich verhindern konnte.

#### **2.4.3.2 Staub – Messergebnisse, Abhängigkeit vom Aschegehalt und mögliche Ansätze einer Emissionsminimierung**

Der zweite im Geltungsbereich der 1. BImSchV relevante Parameter ist der Gehalt an Staub im Rauchgas. Hier fordert die Verordnung die Einhaltung eines Staubgrenzwertes von  $150 \text{ mg/m}^3$ , bezogen auf einen Volumengehalt an Sauerstoff im Abgas von 13 % unter Normbedingungen. Bei den Versuchen wurden (wenn möglich) drei Wiederholungsmessungen pro Brennstoff nach den Anforderungen der 1. BImSchV, Anlage III direkt im Rohgas durchgeführt. Teilweise erfolgten vergleichende Messungen mit dem Messverfahren nach TA Luft (VDI 2066, Blatt 2 bzw. 7).

Zur Erprobung der Minderung der Staubemissionen kam im Technikum des IE versuchsweise ein Elektrofilter-Prototyp der Firma A. P. Bioenergietechnik GmbH aus Hirschau zum Einsatz, begleitet durch ergänzende Staubmessungen für ausgewählte Brennstoffe der Kampagne 2003/2004.

Während die Verbrennung der eingesetzten holzartigen Referenzbrennstoffe (Holzhackschnitzel bzw. Holzpellets), mit Ausnahme der Ökotherm Anlage, nur zu sehr geringen Staubemissionen im Rohgas führte, musste beim Einsatz von Getreide, speziell von Nacktgetreidearten, ein wesentlich höheres Staubemissionsniveau festgestellt werden (s. Abb. 24 bis 31). Deutliche Unterschiede in der Höhe der Konzentrationen von Staub im Rohgas gab es zwischen den einzelnen Feuerungstechniken. An der Anlage der Firma Agroflam konnten die besten Ergebnisse mit deutlich unter  $100 \text{ mg/m}^3$  nachgewiesen werden.

Die Mitverbrennung mit Holzhackschnitzeln führte bei allen untersuchten Anlagen zu einer Minderung der Staubemissionen gegenüber der reinen Getreideverbrennung und bestätigt somit auch die Ergebnisse der LfU in Bayern /23/.

Die für den Regelbrennstoff Stroh, hier in Form von Strohpellets, ermittelten Staubemissionen weisen teilweise deutliche Überschreitungen des gesetzlich geforderten Grenzwertes auf.

#### **Ferro**

Die Auswertung der Ergebnisse der Staubemissionen der Ferro Anlage ergibt Mittelwerte für die untersuchten Nacktgetreidekörner zwischen  $316 \text{ mg/m}^3$  bei Winterweizen und  $347 \text{ mg/m}^3$  bei Winterroggen, wobei Maximalgehalte bis ca.  $700 \text{ mg/m}^3$  ermittelt wurden (s. Abb. 24). Damit liegen die Werte deutlich über dem Grenzwert von  $150 \text{ mg/m}^3$ , welcher in der 1. BImSchV für Holz und Stroh gefordert wird.

Die Brennstoffmischungen und der Referenzbrennstoff Holzpellets unterschreiten den Grenzwert der 1. BImSchV deutlich und erreichen im Mittel 30 bis  $56 \text{ mg/m}^3$  für die Mischungen bzw.  $17 \text{ mg/m}^3$  für Holzpellets. Mit Zunahme der Getreideanteiles sind auch erhöhte Staubemissionen feststellbar. Diese liegen bei 50 %iger Zumischung von Winterroggen zu Holzpellets bei maximal  $66 \text{ mg/m}^3$  auf einem sehr niedrigen Niveau.

Die untersuchten Einstreustrohpellets weisen maximale Staubgehalte von bis zu 435 mg/m<sup>3</sup> auf. Die große Schwankungsbreite ist ein Indiz für die Inhomogenität der untersuchten Chargen.

Der Vergleich mit Daten aus externen Untersuchungen bestätigt, dass der Staubgrenzwert für Getreide als auch für Halmgutpellets mit dieser Anlagentechnik nicht ohne zusätzliche Sekundärmaßnahmen eingehalten werden kann (s. Tab. 12).

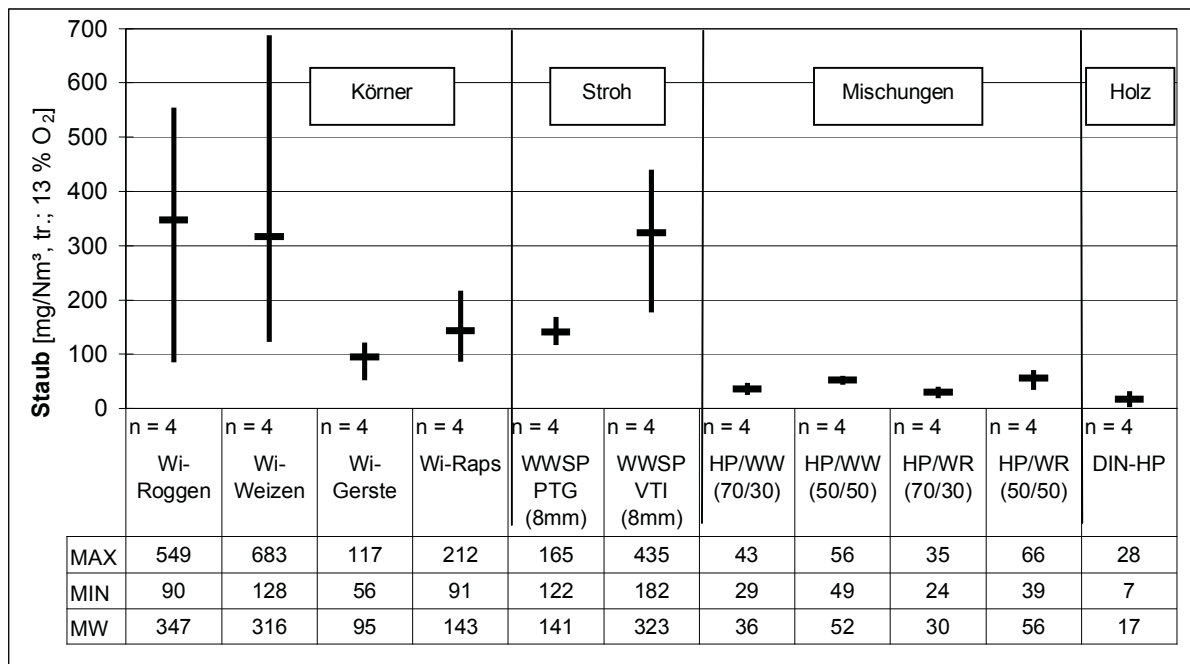


Abbildung 24: Vergleich der Staubkonzentrationen (TA Luft) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH – 2003/04; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

## Reka

An der Reka Anlage wurde mit Ausnahme der Einstreustrohpellets der Grenzwert der 1. BImSchV für die Staubemissionen in Bezug auf die Maximumwerte als auch im Mittel sicher eingehalten. Der für Weizen als Maximum angegebene Wert von 315 mg/m<sup>3</sup> resultiert aus einer Einzelmessung, welcher als Ausreißer betrachtet werden muss. Bei Vernachlässigung dieses Wertes liegen die Emissionswerte im Schwankungsbereich von 49 bis 124 mg/m<sup>3</sup>. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass der eingesetzte Sonderbrennstoff Winterweizenkleiepellets mit im Mittel 62 mg/m<sup>3</sup> ein ähnliches Staubniveau aufweist wie die Getreidekörner (s. Abb. 25).

Eine Minimierung der Staubemissionen ist auch an dieser Anlage durch den Einsatz von Mischungen aus Körnerchargen und Holzbrennstoffen (hier Holzhackschnitzel) zu verzeichnen. Aufgrund des niedrigeren Emissionsniveaus der Körnerchargen und der etwas höheren Staubwerte des eingesetzten Referenzbrennstoffes Holzhackschnitzel (im Mittel 65 mg/m<sup>3</sup>) ist das Minimierungspotential jedoch nicht so hoch wie bei der Ferro Anlage. Dies könnte durch Mischungen mit Holzpellets noch weiter verbessert werden.

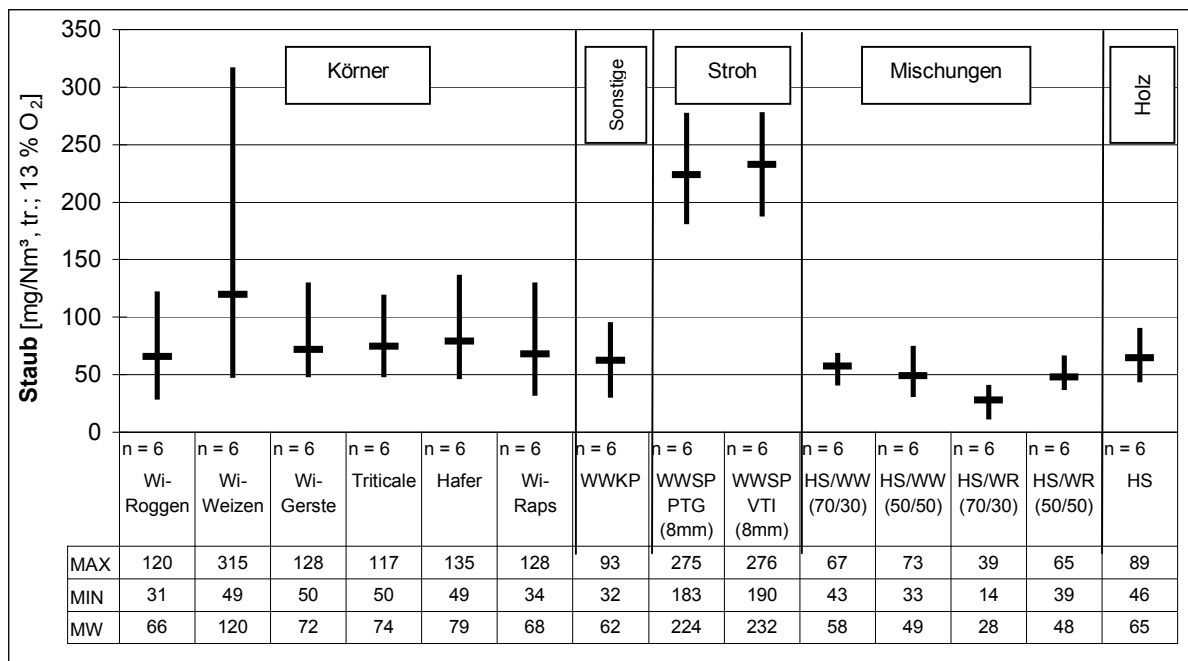


Abbildung 25: Vergleich der Staubkonzentrationen (TA Luft) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Die Grenzwertüberschreitungen für die untersuchten Einstreustrohpelletchargen sowie die Ergebnisse der Messkampagne 2004/05 mit den verbesserten Halmgutpelletchargen (s. Abb. 26) verdeutlichen die Notwendigkeit des Einsatzes von Sekundärmaßnahmen, um einen gesetzeskonformen Praxisbetrieb zu gewährleisten.

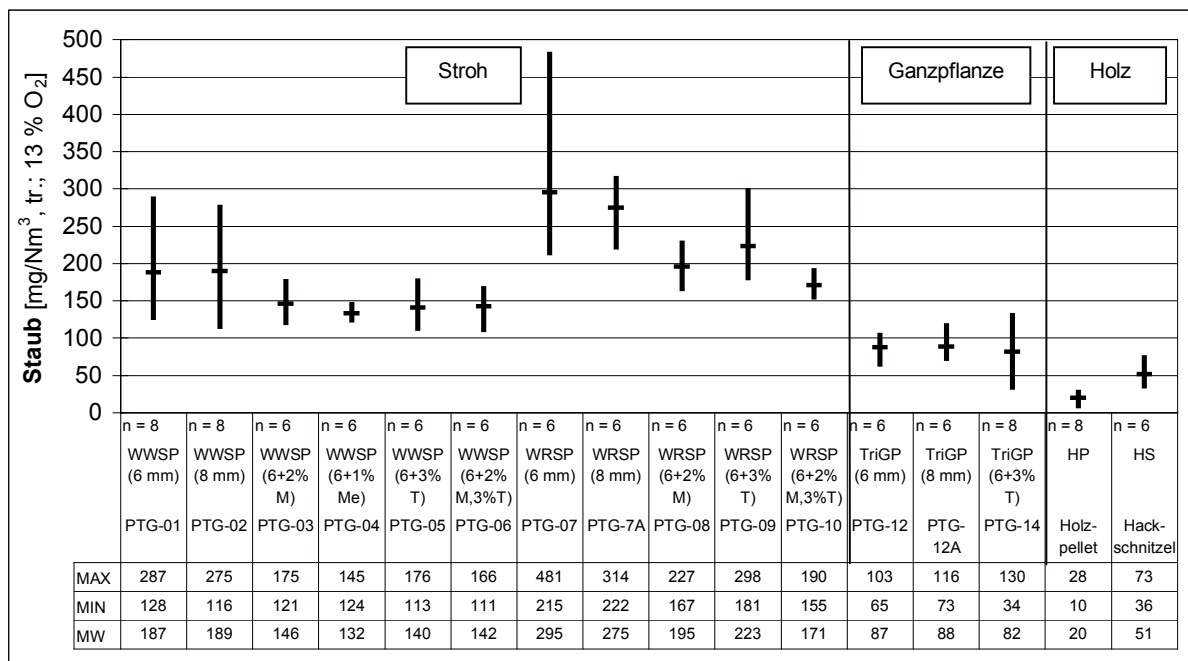


Abbildung 26: Vergleich der Staubkonzentrationen (1. BlmSchV) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomasse – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen



Lediglich mit Triticaleganzpflanzenpellets konnte der geforderte Wert von  $150 \text{ mg/m}^3$  mit im Mittel ca.  $85 \text{ mg/m}^3$  sicher unterschritten werden.

Initiiert durch die TLL wurde im Technikum des IE versuchsweise ein Elektrofilter-Prototyp der Firma A. P. Bioenergietechnik GmbH aus Hirschau installiert und ergänzende Staubbmessungen für festgelegte Brennstoffe der Kampagne 2003/2004 durchgeführt.

In Abbildung 27 werden die gemittelten Staubemissionen aus den Versuchen mit dem Elektrofilter den Messungen ohne Filter gegenübergestellt. Mit Ausnahme der Brennstoffchargen Winterroggen, Einstreustrohpellets (WWSP VTI) und Kleiepellets erfolgte bei den untersuchten Brennstoffen eine Reduzierung der Staubemissionen durch den Einsatz des Elektrofilters. Beim Einsatz der Einstreustrohpelletcharge WWSP PTG wurde durch die sekundäre Staubminderung der Grenzwert nach der 1. BImSchV sicher eingehalten. Die Ergebnisse sind nur bedingt zur Verallgemeinerung von Zusammenhängen und Abhängigkeiten heranzuziehen, da es sich zum Einen um einen recht begrenzten Messumfang und zum Anderen um eine nicht vollständig adaptierte und hinsichtlich des Strömungsprofils der Abgase optimierte Technik handelt. Hier wären weitergehende Untersuchungen zielführend.

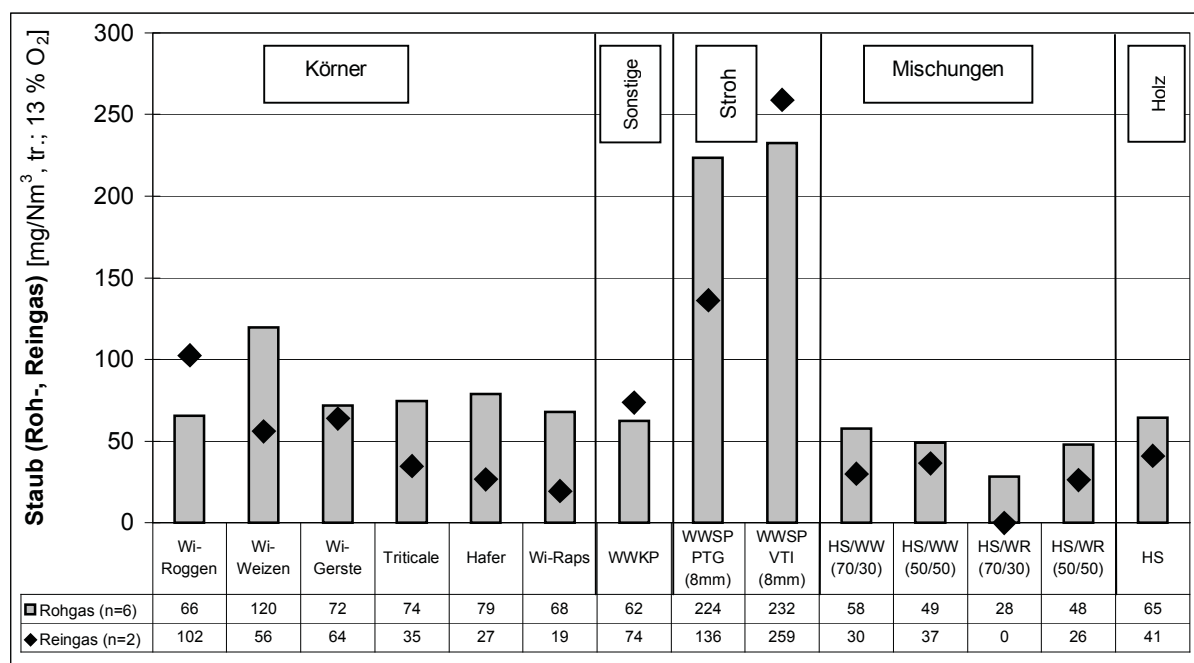


Abbildung 27: Vergleich der Staubkonzentrationen (1. BImSchV) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen im Roh- und Reingas (Elektrofilter) – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Die Untersuchung des Teillastverhaltens zeigt sehr divergente Ergebnisse (s. Abb. 28). Während bei der Verbrennung von Winterroggen- und besonders Winterweizenkörnern im Teillastbetrieb höhere Staubkonzentrationen im Rohgas nachgewiesen wurden, ergaben die Messungen von

Wintergerstenkörnern, Winterweizenkleiepellets und Winterweizeneinstreustrohpellets (WWSP VTI) deutlich geringere Werte als beim Vollastversuch.

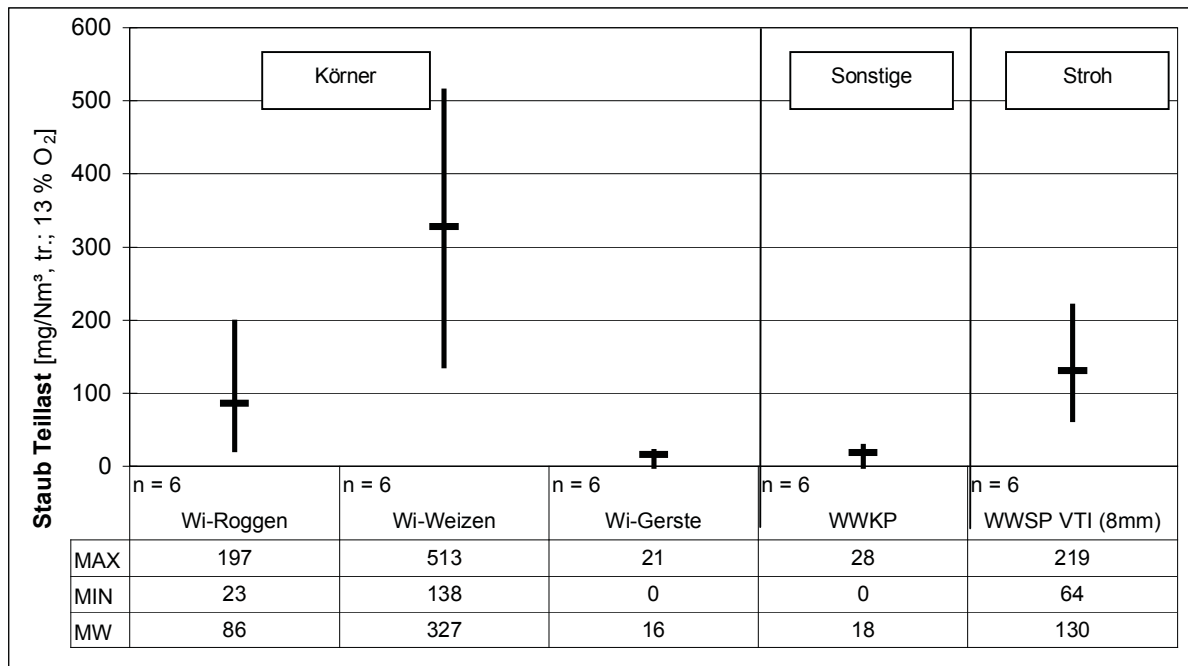


Abbildung 28: Vergleich der Staubkonzentrationen (TA Luft) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen im Teillastbereich – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

## Baxi

Bei der Untersuchung der Baxi Anlage wurde festgestellt, dass die durchschnittlichen Staubgehalte der Getreidekörnerchargen von 179 bis 302 mg/m³ generell über dem Grenzwert für Regelbrennstoffe der 1. BImSchV liegen. Dabei sind etwas geringere Staubniveaus bei den Spelzgetreidearten Hafer (179 mg/m³) und Wintergerste (243 mg/m³) nachweisbar (s. Abb. 29).

Für Mischungen mit holzartigen Brennstoffen konnte eine Reduzierung der Staubkonzentrationen gegenüber der reinen Getreidekörnerverbrennung erzielt werden. Diese ist jedoch nicht ausreichend, um die Einhaltung des Grenzwertes der 1. BImSchV zu gewährleisten.

Beim Einsatz von Halmgutpellets wurden für Winterweizeneinstreustrohpellets (WWSP PTG) mit im Mittel 273 mg/m³ bzw. für Winterweizenkleiepellets (WWKP) 630 mg/m³ ebenfalls deutliche Überschreitungen des Grenzwertes festgestellt. Lediglich beim Einsatz von Rapskörnern konnten neben den holzartigen Brennstoffen Staubwerte kleiner 100 mg/m³ erreicht werden.

Bei diesem Anlagentyp ist somit beim Einsatz von halmgutartigen Brennstoffen, weder in Bezug auf Getreidekörner noch in Bezug auf Strohpellets, die Einhaltung des Grenzwertes ohne sekundäre Abscheidetechnik gegeben.

Die Untersuchungen zum Teillastverhalten mit Winterroggenkörnern zeigen eine Minimierung der Staubentwicklung.

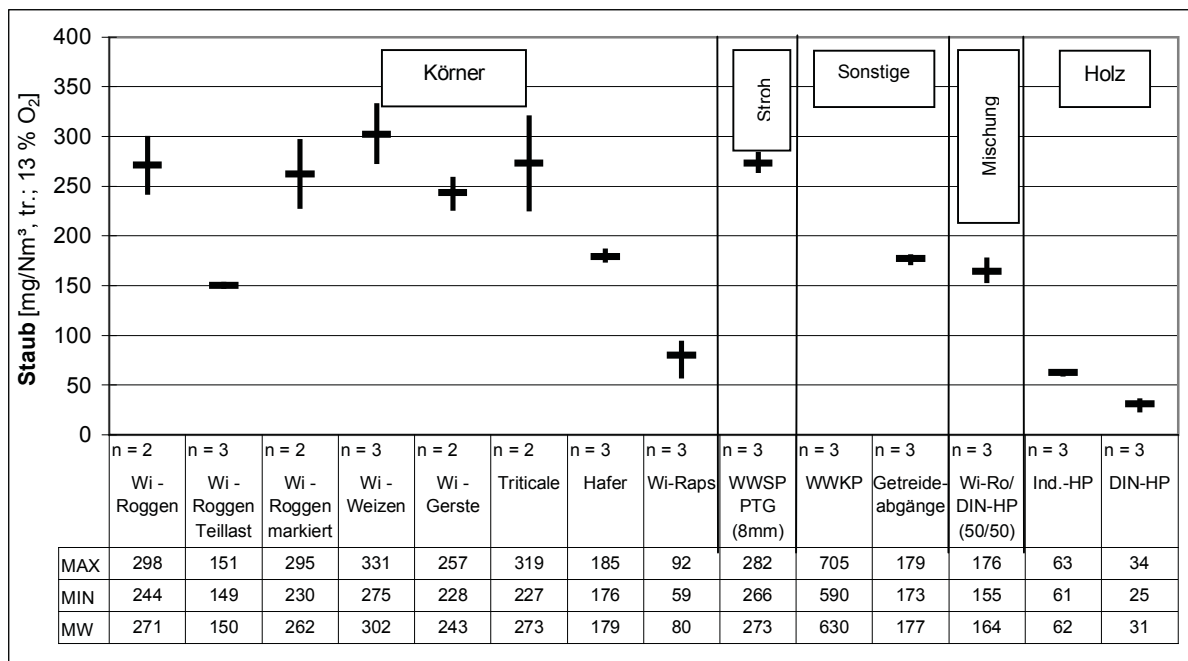


Abbildung 29: Vergleich der Staubkonzentrationen (1. BImSchV) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

## Agroflamm

Die mit Abstand besten Ergebnisse aller untersuchten Anlagen zeigt bei den Staubemissionen der Kessel der Firma Agroflamm (s. Abb. 30). Alle untersuchten Getreidekörnerchargen konnten dabei Staubwerte kleiner  $100 \text{ mg/m}^3$  aufweisen. Vorteile in Bezug auf die absoluten Konzentrationen von Staub im Rohgas ergaben sich auch an dieser Anlage für die Spelzgetreidearten Wintergerste (MW  $33 \text{ mg/m}^3$ ) und Hafer (MW  $24 \text{ mg/m}^3$ ). Diese lagen sogar noch unter denen des für diese Anlage ausgewiesenen Referenzbrennstoffes DIN-Holzpellets (MW  $35 \text{ mg/m}^3$ ).

Des Weiteren konnte für den Einsatz von, in Bezug auf die energetische Verwertung optimierten, Strohpellets mit Werten von z. T. deutlich unter  $50 \text{ mg/m}^3$  der Grenzwert der 1. BImSchV ohne Sekundärmaßnahmen eingehalten werden.

Es sei jedoch angemerkt, dass diese Ergebnisse nach individueller Einstellung auf jeden einzelnen Brennstoff erzielt wurden.

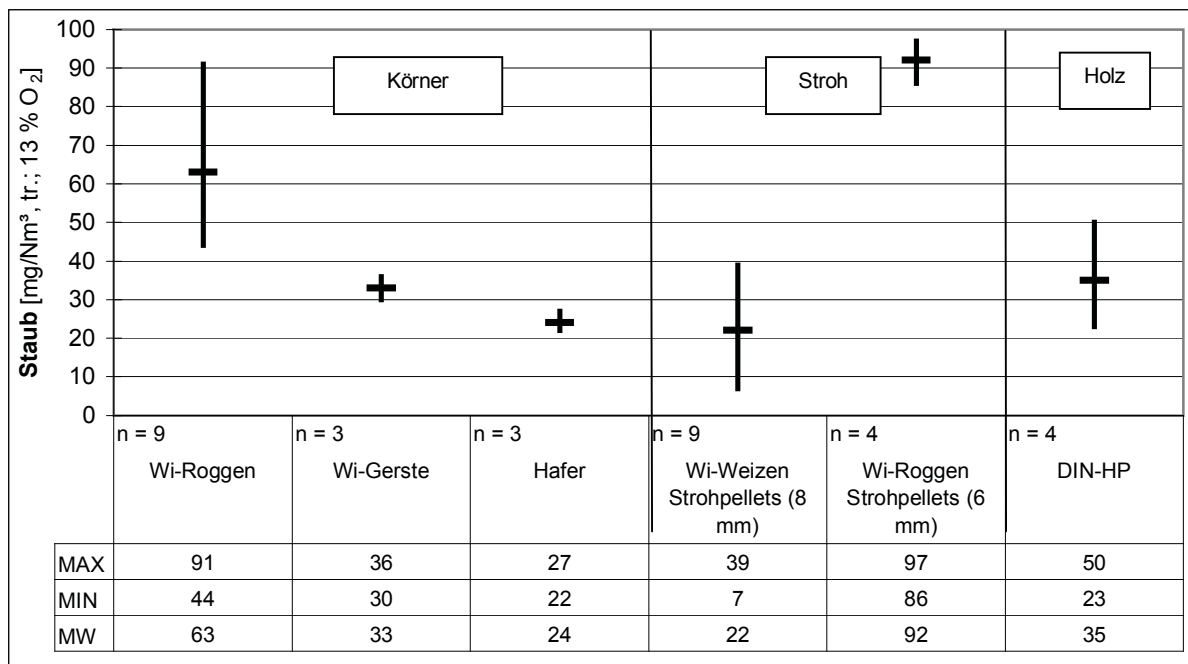


Abbildung 30: Vergleich der Staubkonzentrationen (1. BlmSchV) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflam – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

## Ökotherm

Die Ergebnisse der Staubermittlungen bei den Versuchen an der Ökotherm Anlage zeigen die mit Abstand höchsten Konzentrationen an Staub im Rohgas im Vergleich aller untersuchter Anlagen. Die Reproduzierbarkeit bereits in früheren Untersuchungen festgestellter relativ niedriger Konzentrationen an Staub für Holzbrennstoffe ist aufgrund der Insolvenz der Firma Ökotherm-Projekt GmbH und der damit verbundenen nicht komplett abgeschlossenen Einstellung bzw. Optimierung der Anlage nach dem Umbau nicht gegeben. Dennoch lassen sich generelle Aussagen für die Anlage treffen und mit den Ergebnissen der anderen Feuerungstechniken vergleichen. Das betrifft zum einen die generelle Vorzüglichkeit des Referenzbrennstoffes Holzhackschnitzel sowie die Minimierung der Staubkonzentrationen beim Einsatz von Getreidekörnern durch Mischung mit holzartigen Brennstoffen (s. Abb. 31). Ebenfalls wird ein gewisser Vorteil bei der Nutzung von Spelzgetreide (hier Wintergerste in Mischung mit Holzhackschnitzeln) gegenüber Nacktgetreide (hier Winterroggen in Mischung mit Holzhackschnitzeln) deutlich.

Von der Bestimmung der Staubemissionen bei den untersuchten Chargen der für die energetische Verwertung entwickelten Strohpellets wurde abgesehen, da diese trotz verschlackungsmindernder Zuschlagstoffe nicht für einen kontinuierlichen Betrieb der Anlage geeignet sind.

Ein den gesetzlichen Anforderungen genügender Betrieb der Anlage war nur mit den am Standort installierten Abscheidetechniken (Zyklon/Gewebefilter) möglich.

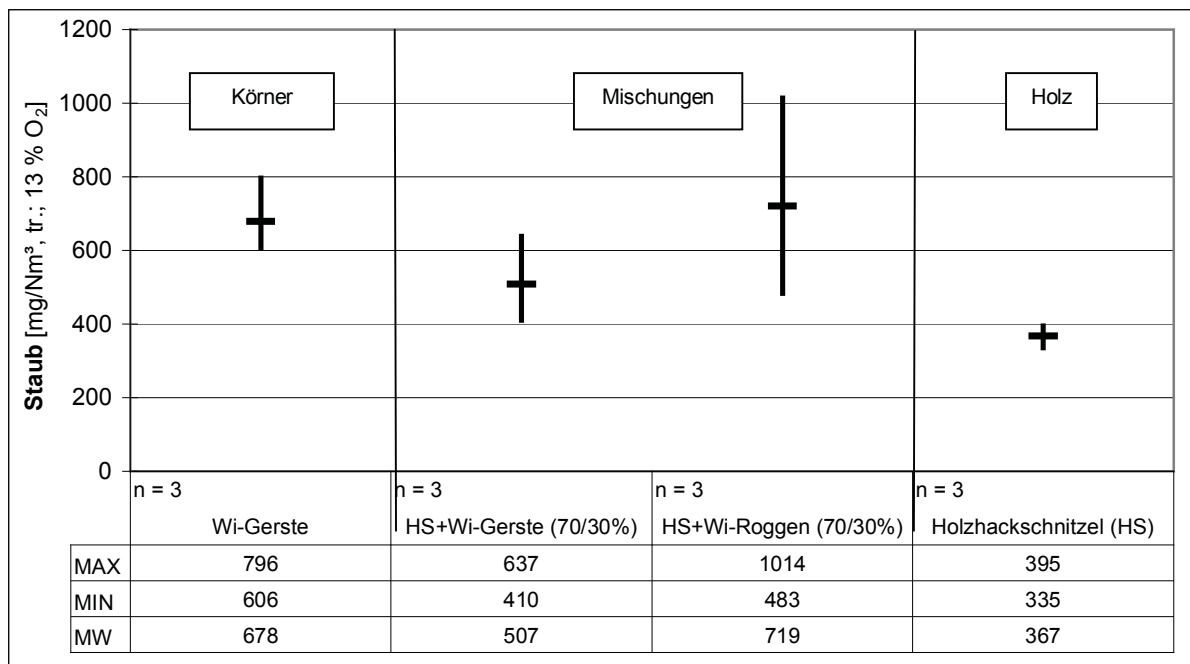


Abbildung 31: Vergleich der Staubkonzentrationen (TA Luft) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am 900 kW Kessel, Fa. Ökotharm – 2004/05; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Die bei der Verbrennung von Getreide und Halmgutpellets sowie sonstigen Brennstoffen ermittelten Staubemissionen weisen einen tendenziellen Zusammenhang mit dem im Labor bzw. im Praxisbetrieb bestimmten Aschegehalten auf, d. h. mit zunehmenden Aschegehalten im Brennstoff steigen die Staubkonzentrationen im Abgas (s. Abb. 32 bis 36). Dabei konnte ein engerer Zusammenhang zwischen den in der Praxis ermittelten Aschegehalten mit den entstehenden Staubemissionen (s. Abb. 34) festgestellt werden, als zwischen den im Labor bestimmten Aschegehalten und den Staubemissionen (s. Abb. 35).

Für die Agroflam Anlage konnte kein Zusammenhang festgestellt werden (s. Abb. 36).

Gegenwärtig wird aufgrund der in Kraft getretenen europäischen Feinstaubrichtlinie verstärkt auch die Entstehung von Feinstäuben aus Feuerungsanlagen diskutiert. Erste Untersuchungen für halmgutartige Brennstoffe weisen generell höhere Feinstaubanteile gegenüber holzartigen Brennstoffen nach /25/,/26/. Der Hauptanteil der Partikelgrößen liegt dabei < 0,5 µm /24/,/27/.

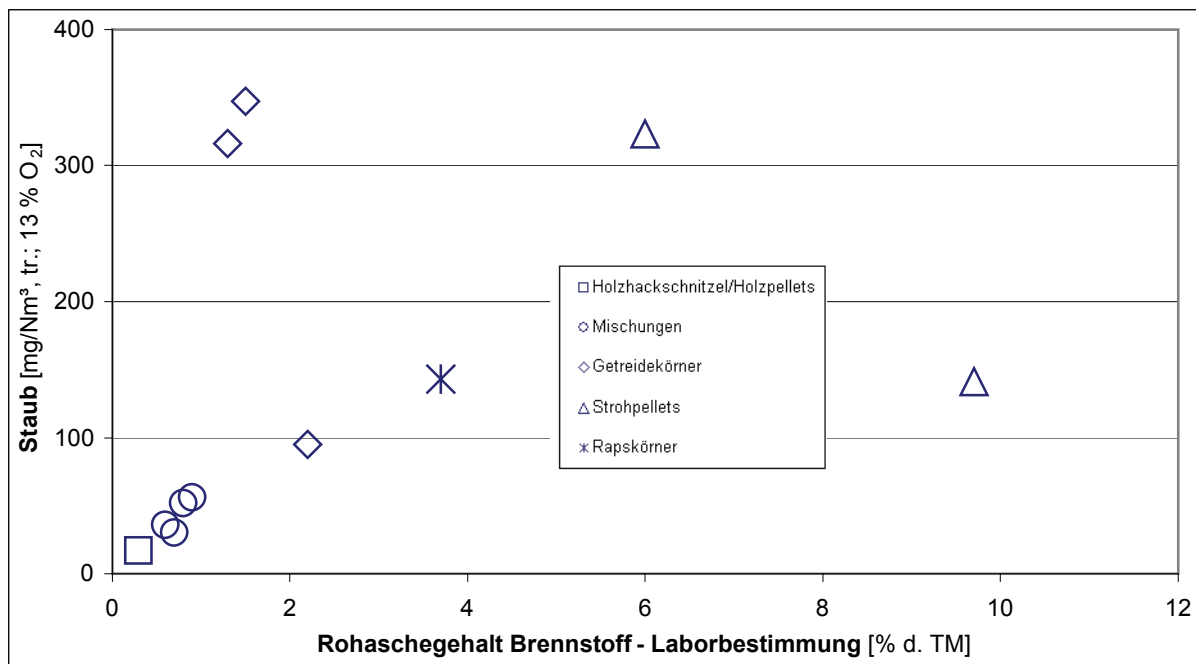


Abbildung 32: Abhängigkeit der Staubkonzentrationen vom Aschegehalt des Brennstoffs – Erhebung von Praxisdaten für Staub am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH und Labordaten für den Aschegehalt – 2003/04; Staubwerte angegeben als Mittelwert der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

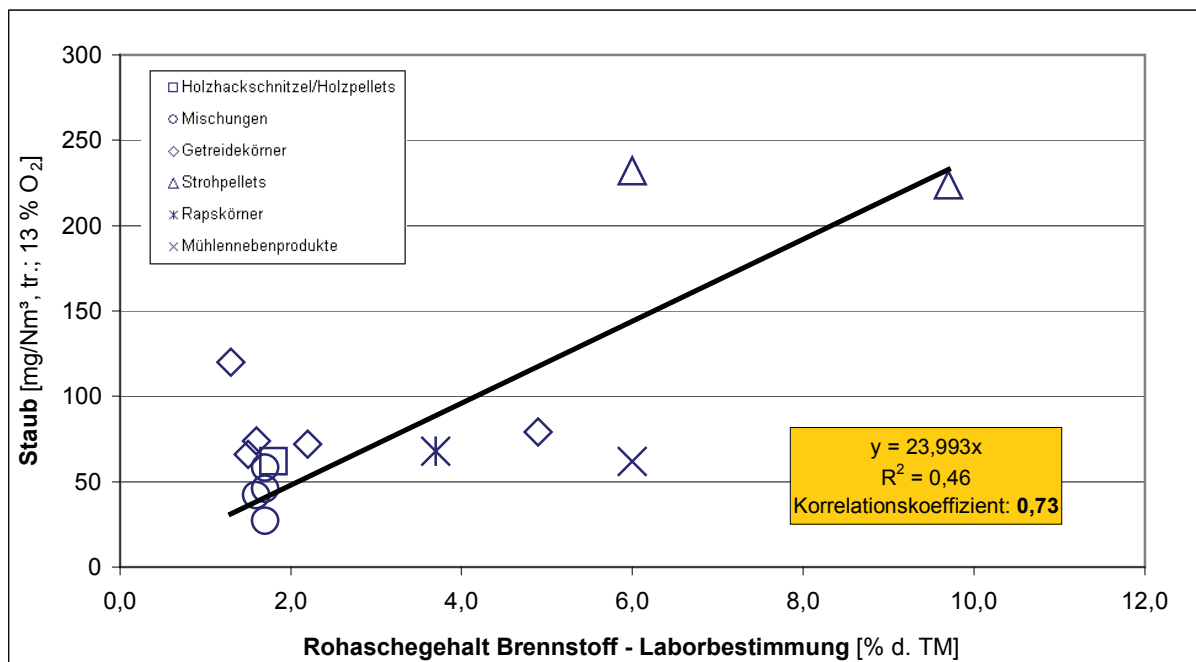


Abbildung 33: Abhängigkeit der Staubkonzentrationen vom Aschegehalt des Brennstoffs – Erhebung von Praxisdaten für Staub am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S und Labordaten für den Aschegehalt – 2003/04; Staubwerte angegeben als Mittelwert der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

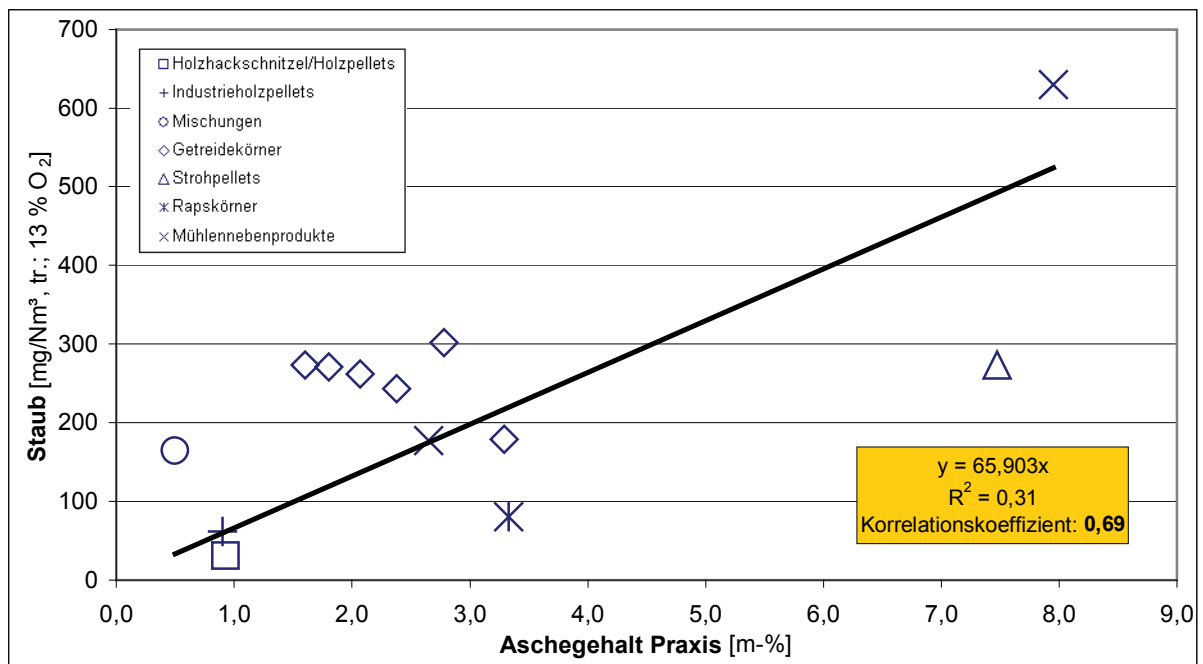


Abbildung 34: Abhängigkeit der Staubkonzentrationen vom Aschegehalt des Brennstoffs – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S – 2003/04; Staubwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

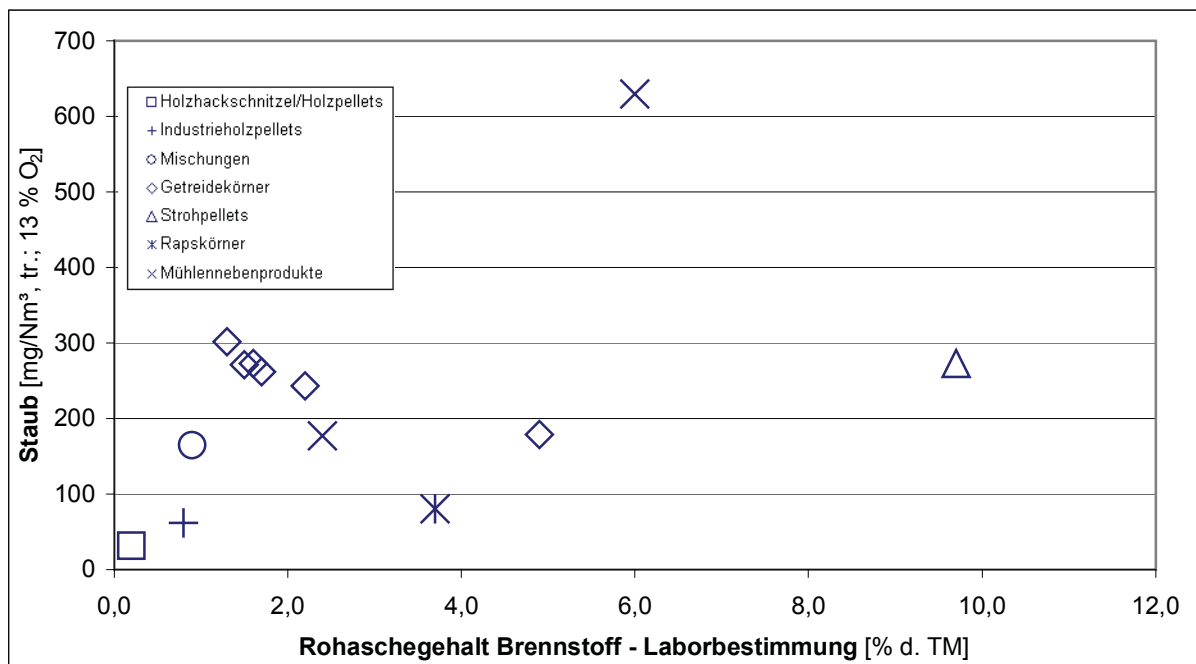


Abbildung 35: Abhängigkeit der Staubkonzentrationen vom Aschegehalt des Brennstoffs – Erhebung von Praxisdaten für Staub am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S und Labordaten für den Aschegehalt – 2003/04; Staubwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

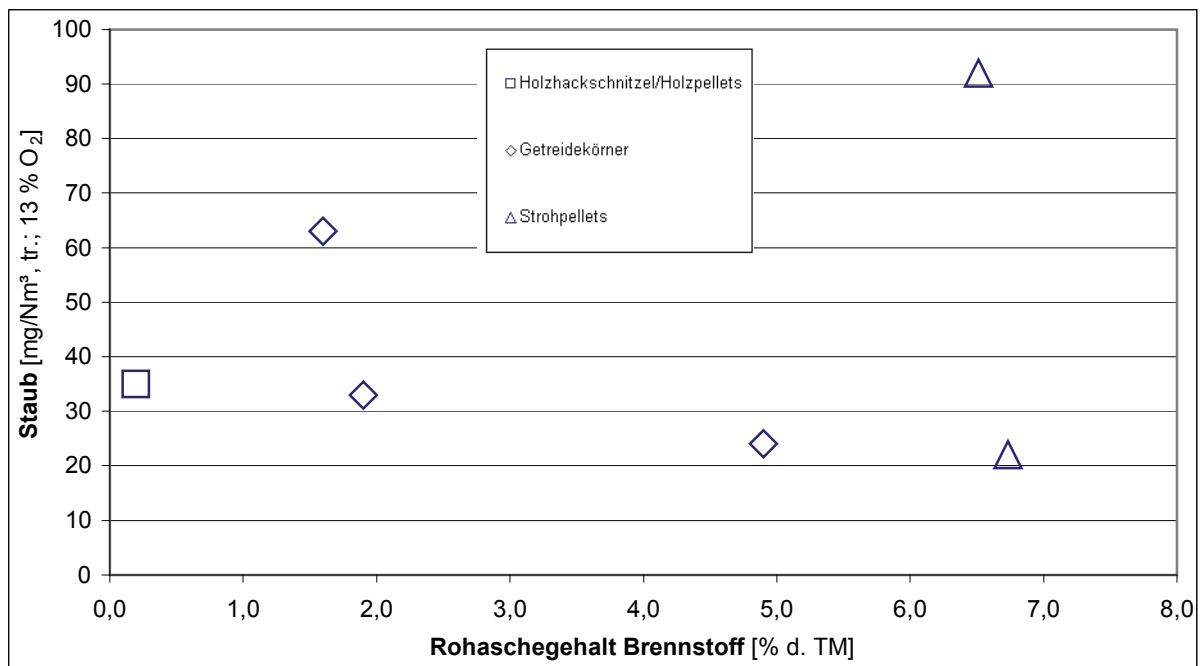


Abbildung 36: Abhängigkeit der Staubkonzentrationen vom Aschegehalt des Brennstoffs – Erhebung von Praxisdaten für Staub am AGRO 40, Fa. Agroflam GmbH und Labordaten für den Aschegehalt – 2004/05; Staubwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

#### Lösungsansätze einer Staubemissionsreduzierung

Trotz positiver Ergebnisse in Bezug auf die ermittelten Staubemissionen besteht im Hinblick auf eine sichere Einhaltung der in der 1. BImSchV bzw. der TA Luft (Anlagen nach 4. BImSchV) geforderten Grenzwerte teilweise die Notwendigkeit des Einsatzes kostengünstiger Staubabscheidetechnologien. Vor allem bei Feuerungsanlagen, welche nicht ausschließlich für den Einsatz von Getreide, Getreidereststoffen bzw. Halmgütern entwickelt wurden, erscheint dieser Einsatz in Praxisanlagen unabdingbar. Dabei besteht nach wie vor das Problem nicht am Markt verfügbarer, preiswerter Technologien. Mit konventionellen Abscheidetechniken, wie sie im Endbericht des IE (s. Anlage 1) u. a. dargestellt werden (Zyklon, Gewebefilter, etc.) ist entweder keine ausreichende Abscheidewirkung erreichbar bzw. die Investitionskosten für die Staubabscheidung stehen in keinem Verhältnis zu den Gesamtinvestitionskosten für Kleinfeuerungsanlagen.

Ergänzend sollen erste bekannte Lösungsansätze aufgezeigt werden. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Prototypanlagen, welche sich fast ausschließlich im Forschungs- und Entwicklungsstadium befinden. Eine Kostenabschätzung ist zur Zeit nur näherungsweise möglich, aufgrund mangelnder Datengrundlage, was die Anforderungen des Filters (Abscheideleistung, Standzeiten) sowie der für die Kostenkalkulation wichtige Punkt der Absatzmöglichkeiten (Kostendegression durch hohe Stückzahlen) betrifft.



### *1. Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK)*

Das ILK Dresden befasst sich gegenwärtig mit der Entwicklung und Optimierung von speziell an die Verbrennung biogener Festbrennstoffe angepassten Abgasreinigungssystemen. In deren Ergebnis befindet sich eine Kombination aus Vorabscheider und Filter im Patentverfahren (Gebrauchsmusterschrift DE 202 18 214 U1). Außerdem erfolgte durch das ILK in der Heizperiode 2003/2004 die Untersuchung eines Kleinelektrofilters für die Brennstoffe Stroh- und Heupellets sowie Getreide für Feuerungsanlagen im Leistungsbereich von 49 kW<sub>th</sub>. Die Erprobung des Filters zeigte, dass ein stabiles Abscheideverhalten mit Reingasstaubgehalten unter 5 mg/m<sup>3</sup> möglich ist. Probleme bestehen jedoch noch bei sich bildenden fest anhaftenden Belägen. Hier sollen Versuche mit einer veränderten Strömungsführung sowie beschichteten Niederschlagselektroden zu Verbesserungen führen /26/. Derzeitig werden die Kosten für einen Elektrofilter im relevanten Leistungsbereich mit bis zu 8.000 € angegeben. Bei einer entsprechenden Serienfertigung ist von einer Reduzierung des Preises auf deutlich unter 3.000 € auszugehen /28/.

### *2. Fachhochschule Amberg-Weiden*

Die Fachhochschule Amberg-Weiden hat in Zusammenarbeit mit einem Kooperationspartner aus der Wirtschaft eine Elektrofilteranlage für kleine Biomassekessel (25 - 150 kW<sub>th</sub>) entwickelt und getestet. Erste Ergebnisse zeigen für diese preiswerte Variante eines Elektrofilters z. B. für Triticalekörner mit einem Gesamtabscheidegrad von 78,8 % und erreichten Staubkonzentrationen im Reingas von 41,9 mg/m<sup>3</sup> einen vielversprechenden Ansatz /27/. Die Kosten werden für in Serie gefertigten Anlagen mit 3.000 € angegeben.

Gegenwärtig wird in Zusammenarbeit mit dem ATZ Sulzbach-Rosenberg sowie der Firma Grimm, neben der Entwicklung einer Feuerungstechnologie für Halmgutbrennstoffe, an der Entwicklung einer Abscheidetechnik für Stäube aus Kleinfeuerungsanlagen gearbeitet.

### *3. Firma Verfahrenstechnik Schulz*

Das Ingenieurbüro Schulz entwickelte eine neuartige Prototypanlage zur Abscheidung von Rauchgasstäuben für kleine Biomassekessel /29/. Dabei soll eine Kombination aus Zyklonfiltern und Rauchgaswäsche Verwendung finden. Die geschätzten Kosten liegen unter 10.000 €. Der für das 4. Quartal erstmalig an einer Getreidefeuerungsanlage in Baden Württemberg angedachte Test wurde jedoch auf unbestimmte Zeit verschoben. Die Betreiber der für den Test vorgesehenen Feuerungsanlage (Klostermühle Heiligenzimmern) favorisieren deshalb einen Abscheider der Fa. Winkel, der auf einer Entwicklung des ILK, Dresden basiert.

### *4. Dänisches Technologisches Institut für Verbrennung*

Hier wurden bereits in der Vergangenheit Untersuchungen mit Elektrofiltern an Strohkesseln durchgeführt. Ob diese Ergebnisse zufriedenstellend für die Anforderungen nach den rechtlichen Rahmenbedingungen in Deutschland sind bzw. auch für den Einsatz von Getreidekörnern gelten,

konnte nicht beurteilt werden, da diese ausschließlich in dänischer Sprache veröffentlicht wurden und trotz mehrfacher Nachfrage nicht verfügbar sind.

#### *5. Maskinfabriken Reka A/S*

Die Firma hat einen kleinen Elektrofilter entwickelt, welcher jedoch noch nicht getestet werden konnte. Die Deula in Rendsburg erprobt gegenwärtig diese Technik in Zusammenhang mit einer Reka Feuerungsanlage HKRST-100 im Rahmen eines FNR-Forschungsvorhabens für landwirtschaftliche Haupt- und Nebenprodukte.

#### *6. Firma Gerlinger*

Die Firma Gerlinger hat für Kessel bis zu 130 kW<sub>th</sub> verschiedene Größen von Kartuschenfiltern entwickelt. Ergebnisse der Tests liegen bislang nicht vor.

#### *7. TU Graz*

Die Weiterentwicklung eines Zyklons durch die TU Graz stellt der rotierende Partikelseparator (RPS) dar. Ziel dieser Entwicklung war es, auch für kleine Anlagen kostengünstige Partikelabscheider mit hohen Abscheidegraden und Reingaskonzentrationen unter 50 mg/m<sup>3</sup> zu gewährleisten. Bei diesem Partikelabscheider werden die Abgase in einen zyklonähnlichen Abscheideraum eingeleitet und dort vorentstaubt. Statt eines Tauchrohres ist ein wabenförmiges Filterelement in der Mitte dieses zyklonartigen Gehäuses angebracht, das um seine Längsachse rotiert. Durch die parallel verlaufenden Längskanäle strömt das mit Feinstaub beladene Abgas. Aufgrund der aufgezwungenen Fliehkräfte durch die Rotation werden die Partikel in den Röhren abgeschieden. Das gereinigte Gas verlässt die Röhren und der angesammelte Staub wird periodisch durch Druckluftstöße aus den Rohren ausgeblasen. Dieser Separator verfügt allerdings über bewegte Teile und ist damit in seinem Aufbau und Betrieb komplizierter als ein Zyklon.

Darüber hinaus gibt es zahlreiche Forschungsaktivitäten, welche sich ursprünglich mit der Entwicklung von Staubminderungsmaßnahmen für Holzfeuerungsanlagen beschäftigt haben und nach entsprechender Adaption an die Staubprofile von halmgutartigen Brennstoffen denkbare Lösungsansätze bilden könnten /30/, /31/, /32/, /33/.

Weitere Technologien zur Abscheidung von Stäuben wurden von unterschiedlichen Firmen, z. B. WVT - Bioflamm GmbH (Metall-Vlies-Patronenfilter), Scheuch GmbH, BHSU Luft- und Umwelttechnik GmbH (beide Schlauchfilter) oder BETH Lufttechnik GmbH (Elektrofilter) entwickelt. Der Einsatz dieser Staubabscheidetechnologien ist aber aufgrund der hohen Investitionskosten für kleine Biomassekessel unrealistisch. Einen Überblick über vom IE recherchierte Staubfiltertechnologien gibt Anlage I, Kapitel 4.

### 2.4.3.3 Stickoxide (NO<sub>x</sub>) – Messergebnisse, Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt und mögliche Ansätze der Emissionsminderung

Die Stickoxidbildung bei der Verbrennung kann grundsätzlich auf drei verschiedenen Reaktionswegen erfolgen:

- NO<sub>x</sub>-Bildung aus Brennstoffstickstoff
- Thermische NO<sub>x</sub>-Bildung
- Prompte NO<sub>x</sub>-Bildung

Für Biomassekleinfeuerungsanlagen ist aufgrund der erreichbaren Feuerraumtemperaturen von ca. 900-1.200 °C fast ausschließlich der Stickstoffgehalt im Brennstoff für die NO<sub>x</sub>-Bildung verantwortlich [25]/[34]. Die Ergebnisse der Messungen (Summenwert aus Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid) zeigen erwartungsgemäß über alle Anlagen und Brennstoffe hinweg einen direkten Zusammenhang zwischen den Brennstoffstickstoffgehalten und NO<sub>x</sub>-Konzentrationen im Abgas. Generell kann dabei festgestellt werden, dass holzartige Brennstoffe neben sehr guten Abbrandergebnissen, die mit Abstand niedrigsten NO<sub>x</sub>-Konzentrationen aufweisen, gefolgt von den Brennstoffmischungen. Halmgutpellets liegen auf einem mittleren Niveau, während die höchsten Werte bei den Körnerchargen gemessen wurden (s. Abb. 37 bis 46).

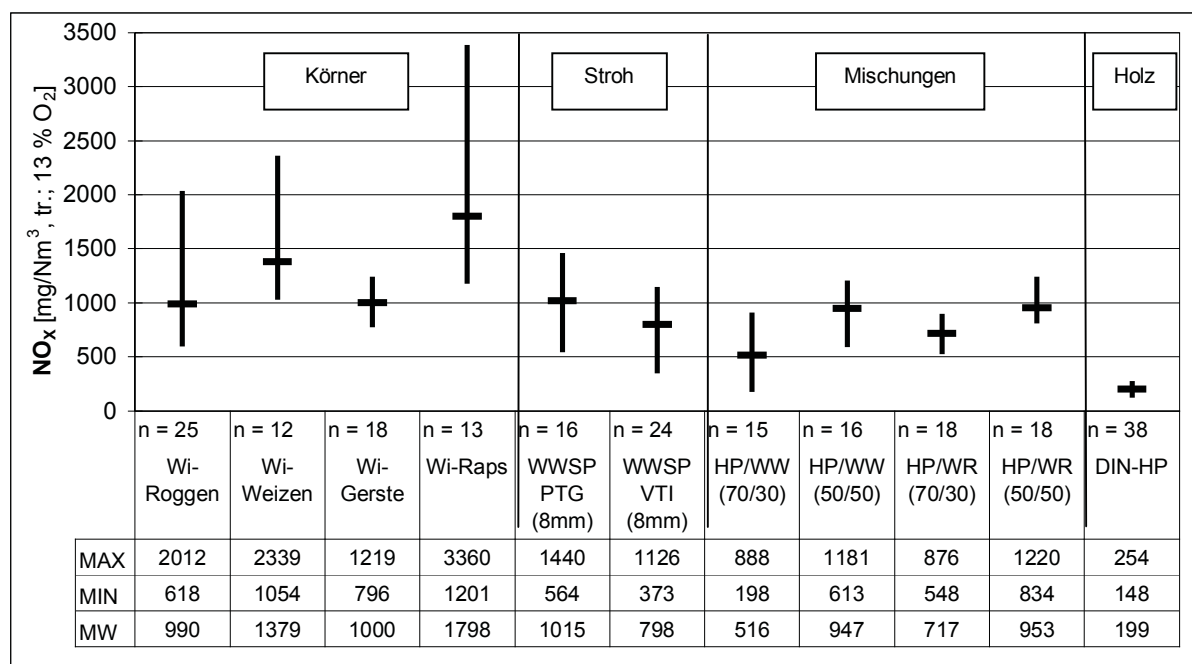


Abbildung 37: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

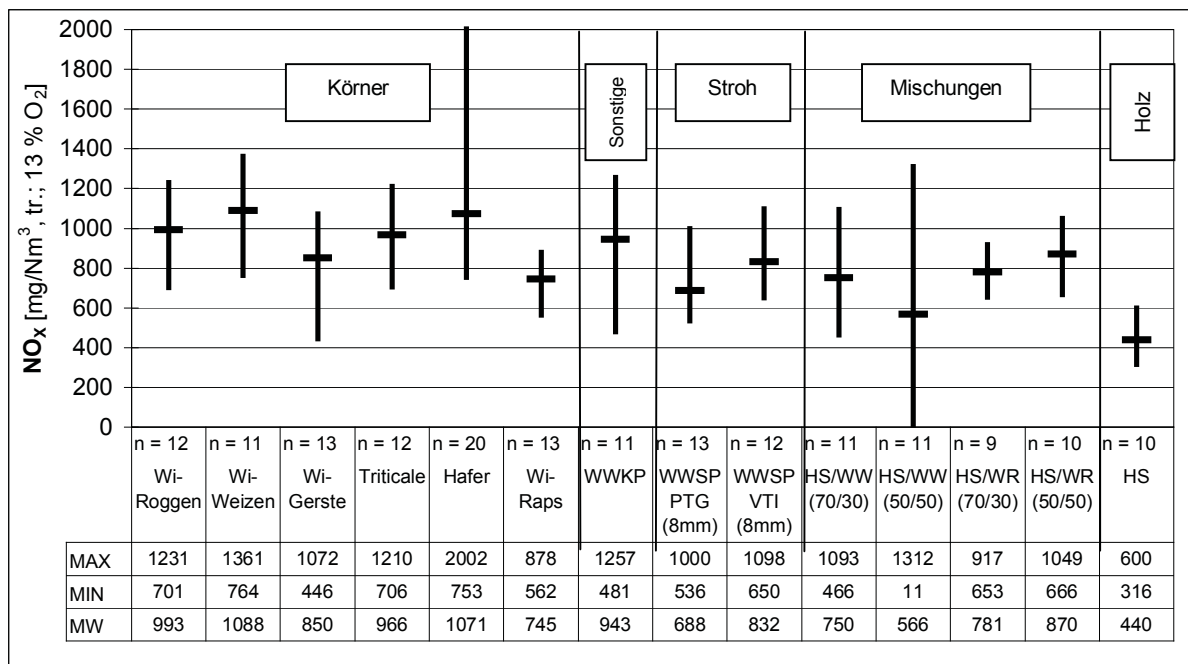


Abbildung 38: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

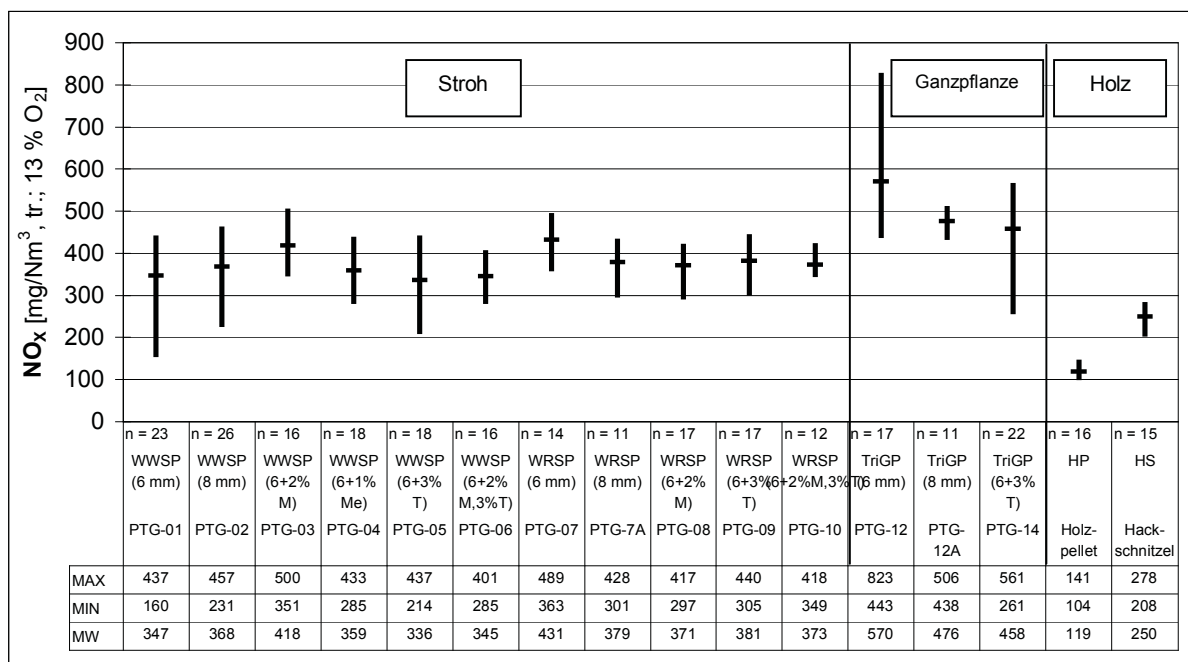


Abbildung 39: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomasse – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

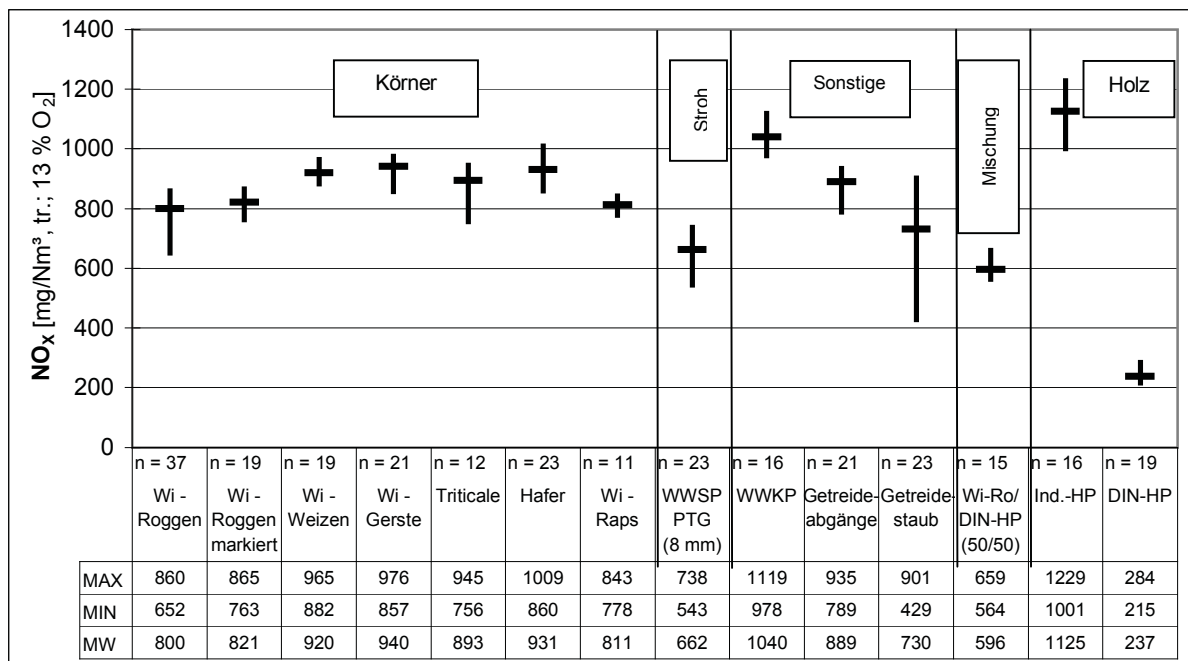


Abbildung 40: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT Modell 2,5; Fa. BAXI A/S – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

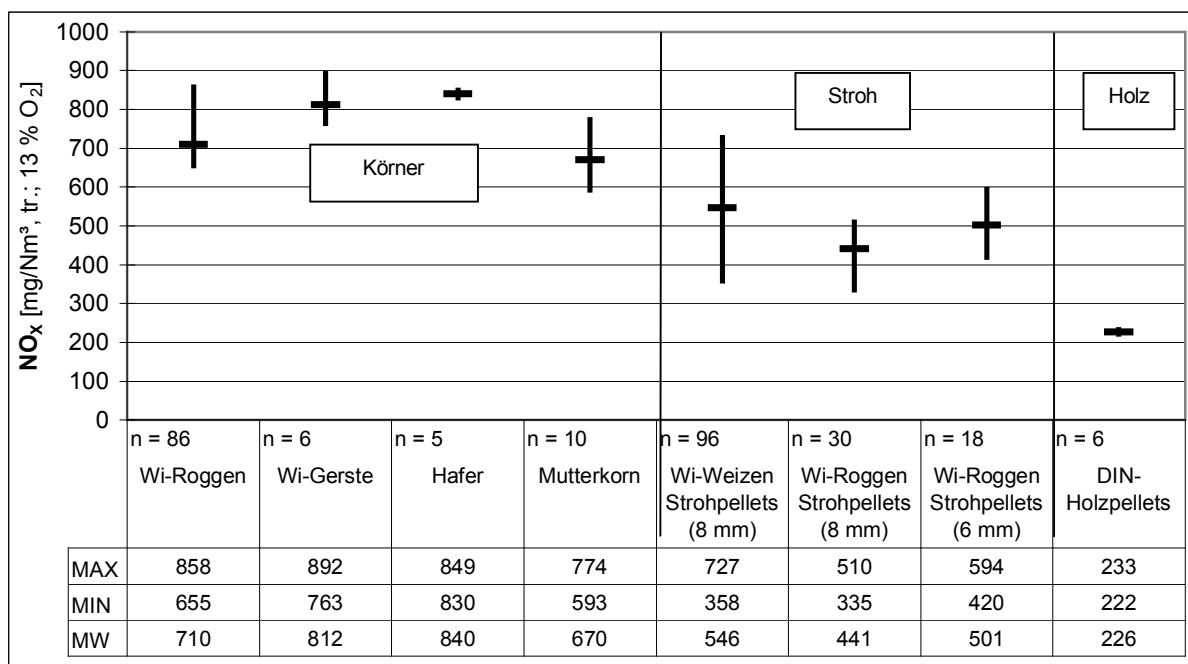


Abbildung 41: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflamm – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

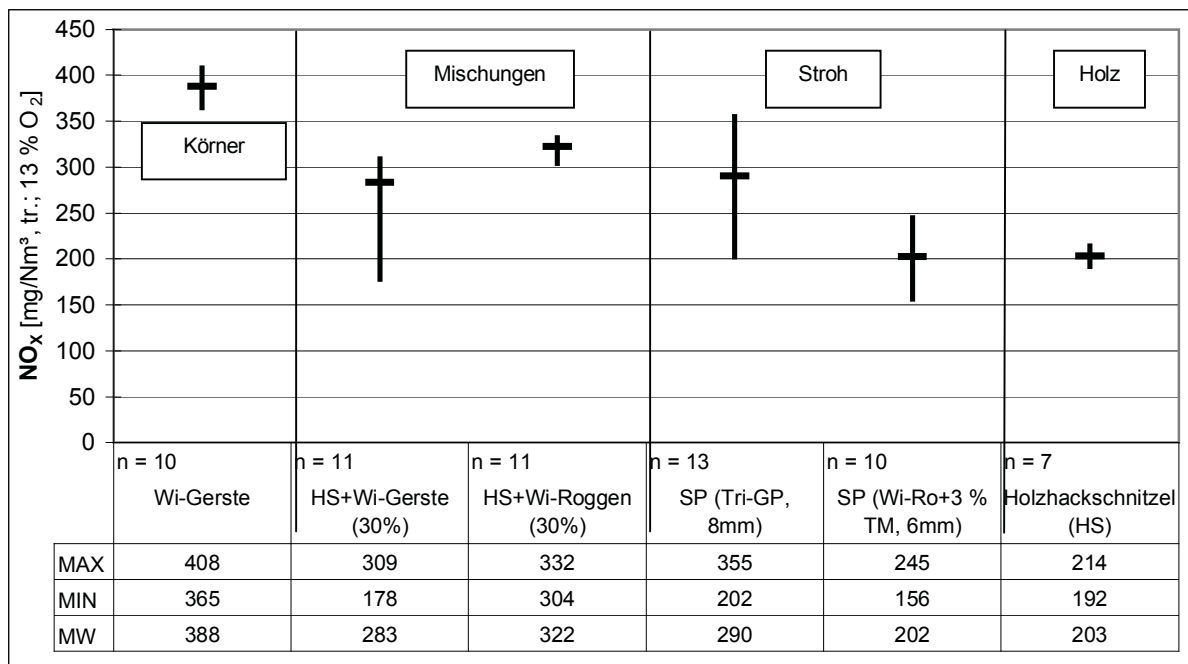


Abbildung 42: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am 900 kW Kessel, Fa. Ökotherm GmbH – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Für den Einsatz von Mühlennebenprodukten wie z. B. Winterweizenkleiepellets und Industrieholzpellets sowie Rapskörnern, welche die höchsten Stickstoffgehalte der untersuchten Brennstoffe aufweisen (s. Tab. 6 und 7), wurden auch die höchsten absoluten Emissionswerte festgestellt. Triticaleganzpflanzenpellets liegen brennstoff- als auch emissionsseitig erwartungsgemäß zwischen Stroh und Getreidekörnern. Der Vergleich der Getreidearten zeigt, dass Winterroggen und Wintergerste mit geringeren Stickstoffgehalten, aufgrund geringerer Rohproteingehalte, deutlich geringere Stickoxidemissionen verursachen als beispielsweise Weizen und Hafer.

Legt man für eine Bewertung der  $\text{NO}_x$ -Emissionskonzentrationen der halmgutartigen Brennstoffe die Anforderungen der 4. BImSchV und damit der TA Luft mit einem Grenzwert von  $0,5 \text{ g/m}^3$  bezogen auf einen Restsauerstoffgehalt im Abgas von 11 % für Anlagen  $< 1 \text{ MW}_{\text{th}}$  (Anlagen der Nummer 1.3) zu Grunde, wird deutlich, dass dieser sicher nur von der Ökotherm Anlage mit teilweise jedoch nur ungenügendem Ausbrand eingehalten werden kann (s. Abb. 42). Für die betrachteten Feuerungsanlagen  $< 100 \text{ kW}_{\text{th}}$  kann der Grenzwert lediglich mit den speziell für die energetische Verwertung hergestellten Strohpellets in der Reka Anlage eingehalten werden (s. Abb. 39).

Eine strenge Korrelation der  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen mit dem Brennstoffstickstoff verdeutlichen die Abbildungen 43 bis 46. **Daraus folgt, dass lediglich bis zu einem Stickstoffgehalt im Brennstoff von ca. 0,3 % i. d. TM ein den Anforderungen der TA Luft entsprechender Betrieb ohne zusätzliche Maßnahmen an der Feuerungsanlage gewährleistet werden kann.** Weitergehende Vorkehrungen zur Minimierung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen sind somit unabdingbar. Die Senkung des Stickstoffgehaltes

im Brennstoff durch Vorauswahl der Brennstoffarten bzw. Sorten reicht nicht aus, die o. g. Anforderungen sicher zu erfüllen (s. Abb. 47, 48) /35/.

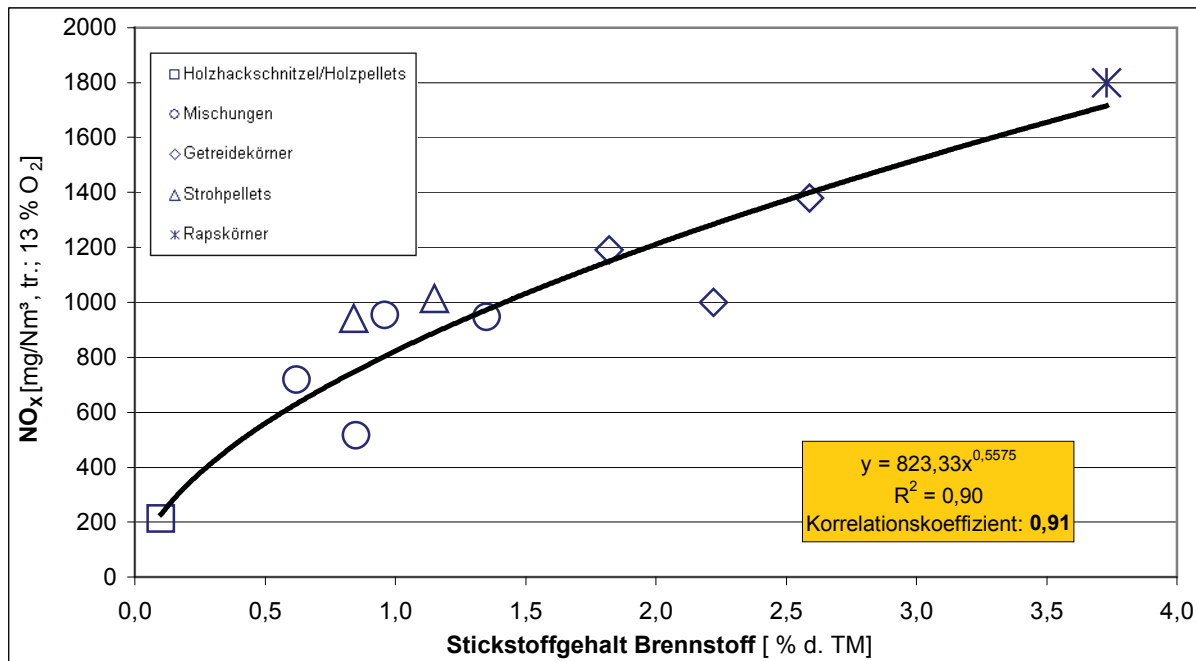


Abbildung 43: Abhängigkeit der Stickoxidkonzentrationen vom Stickstoffgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH und Labordaten für den Stickstoffgehalt – 2003/04; Stickoxidwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

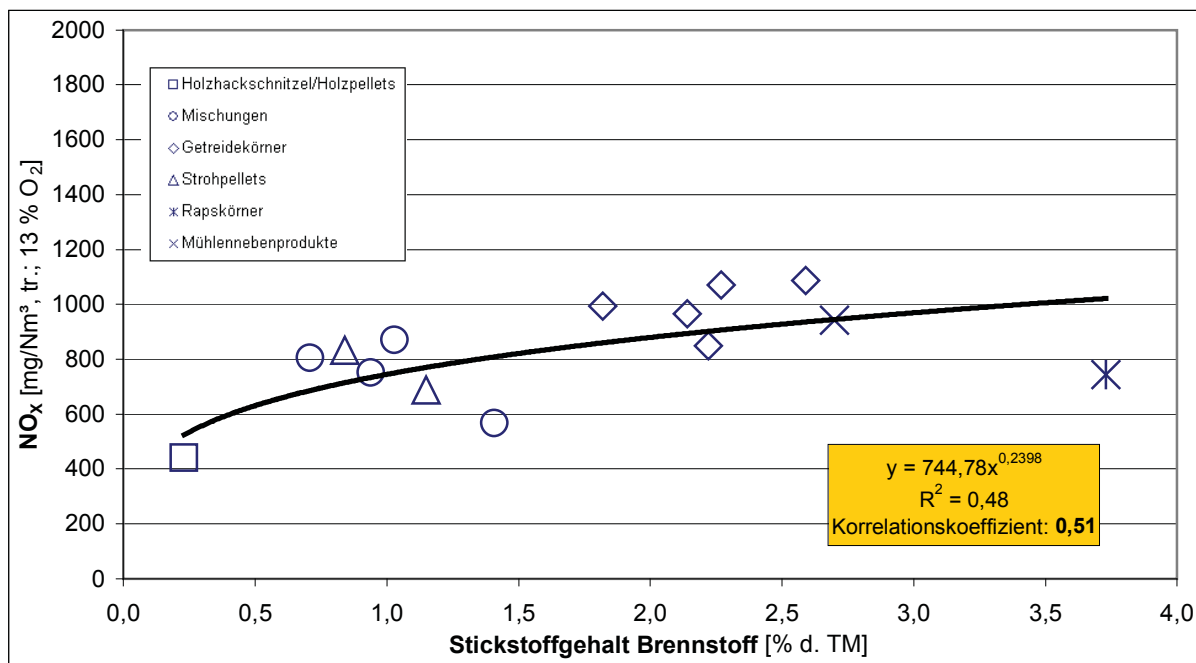


Abbildung 44: Abhängigkeit der Stickoxidkonzentrationen vom Stickstoffgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S und Labordaten für den Stickstoffgehalt – 2003/04; Stickoxidwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

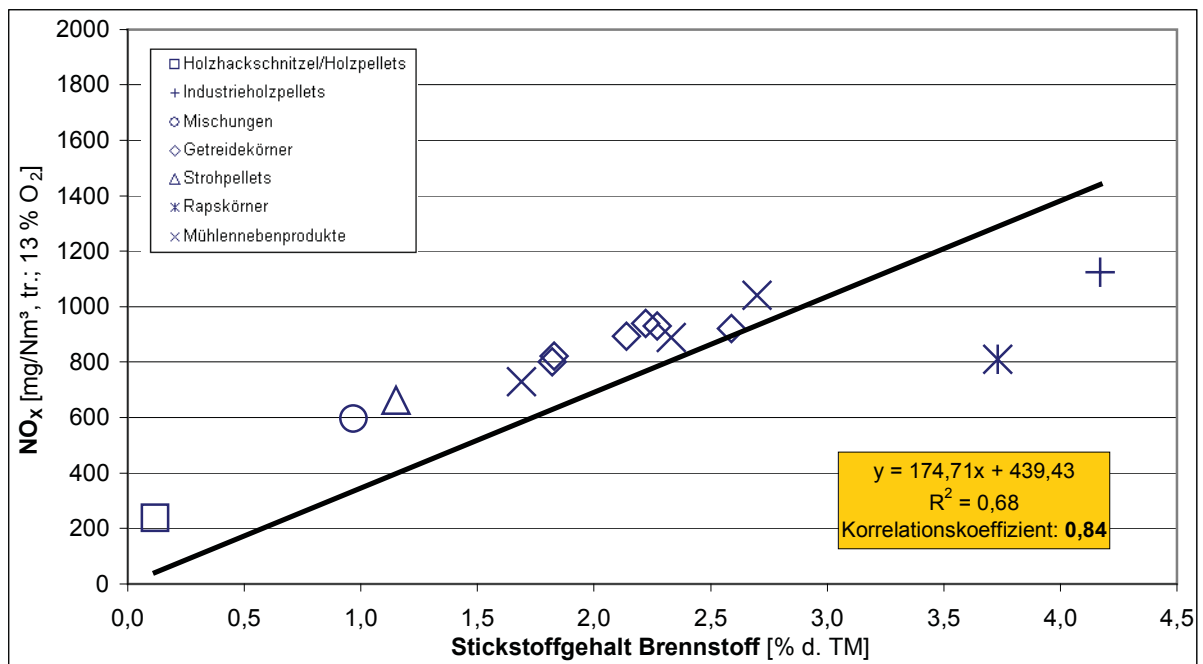


Abbildung 45: Abhängigkeit der Stickoxidkonzentrationen vom Stickstoffgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S und Labordaten für den Stickstoffgehalt – 2003/04; Stickoxidwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

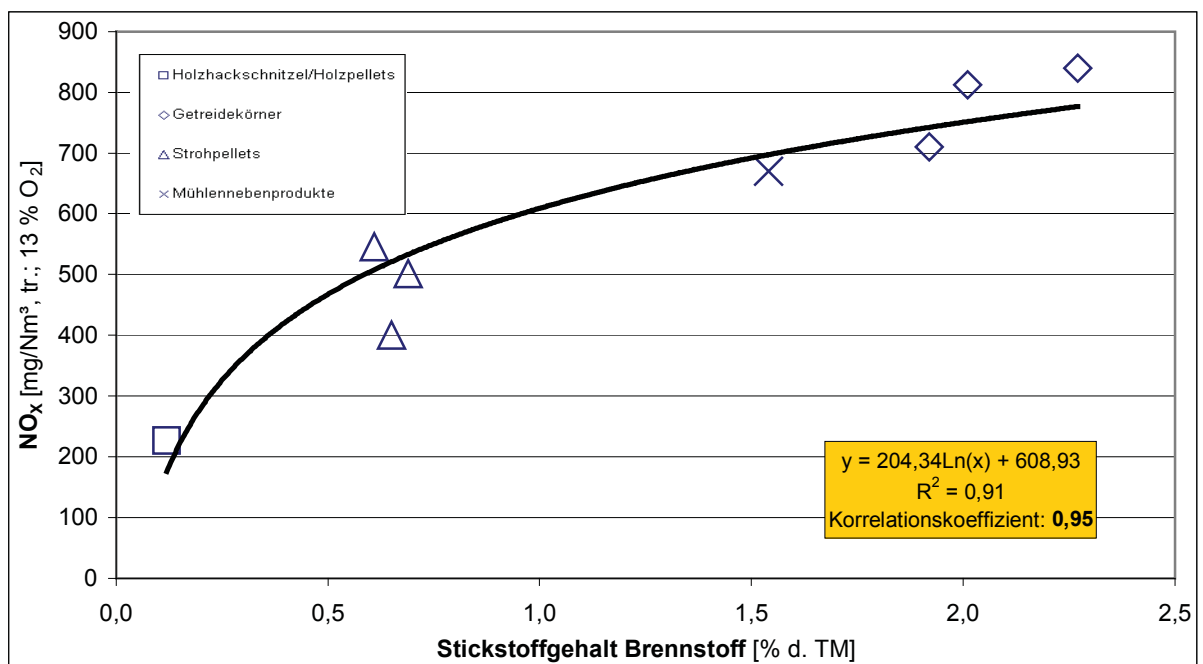


Abbildung 46: Abhängigkeit der Stickoxidkonzentrationen vom Stickstoffgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflam GmbH und Labordaten für den Stickstoffgehalt – 2004/05; Stickoxidwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen



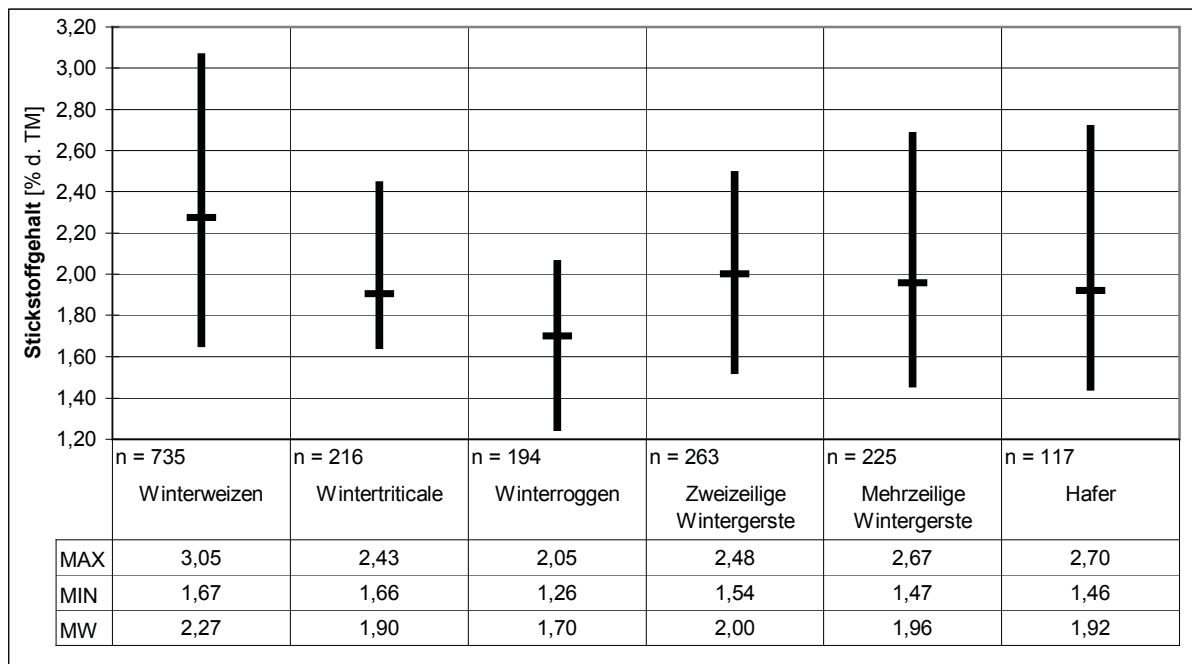


Abbildung 47: Vergleich der Schwankungsbreiten der Stickstoffgehalte von Getreidearten /4/, /5/, /6/, /7/, /8/

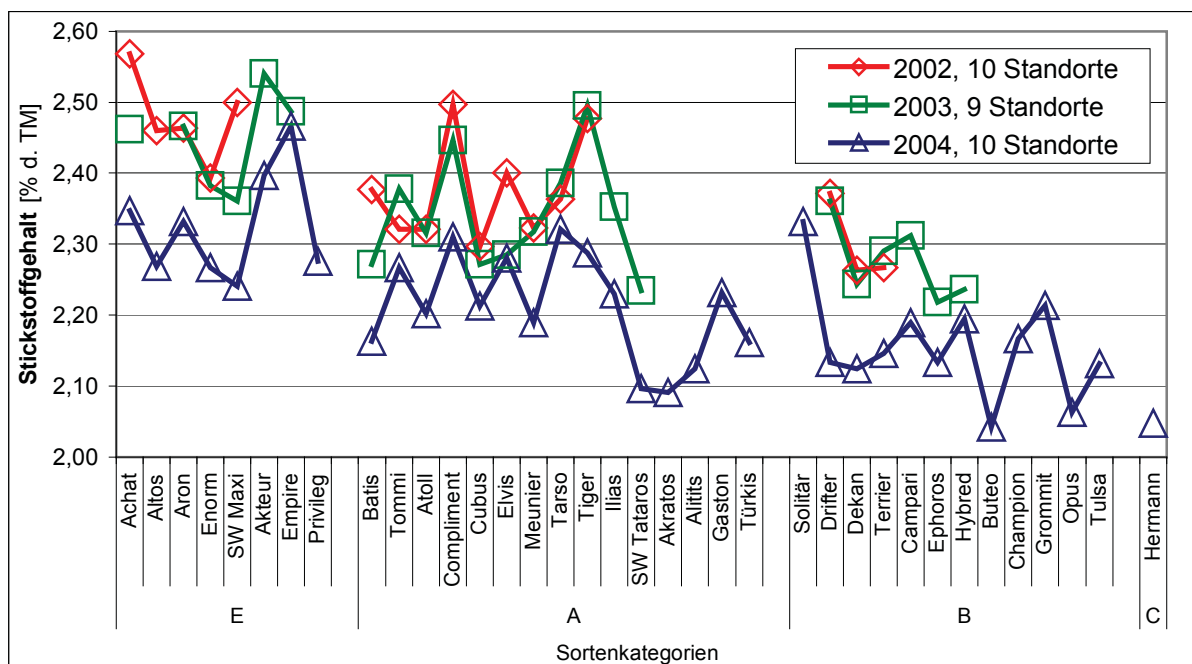


Abbildung 48: Vergleich der Stickstoffgehalte verschiedener Winterweizensorten auf Löß- bzw. Verwitterungsböden /4/

#### Lösungsansätze einer Stickoxidemissionsminderung

Prinzipiell können verschiedene Maßnahmen im Bereich der Feuerung vorgenommen werden, unterschieden in Primär- und Sekundärmaßnahmen. Primärmaßnahmen greifen direkt in den Verbrennungsablauf ein, um die Bildung von Stickoxiden zu unterbinden.

Bei der Luftstufung ist der Brennraum in unterschiedliche Reaktionszonen aufgeteilt. Es erfolgt eine gestufte Zugabe von Verbrennungsluft und Brennstoff. Im brennernen Bereich entsteht eine

unterstöchiometrische Reduktionszone, in der durch sich bildende Reduktionsmittel Stickstoffoxid abgebaut wird. Die Zugabe der Ausbrandluft in der darauffolgenden Zone sorgt für einen vollständigen Ausbrand /34/. Bei der Luftbegrenzung zur Unterdrückung der  $\text{NO}_x$ -Bildung ist darauf zu achten, dass sich dadurch nicht zu hohe CO-Werte ergeben.

Die Abgasrückführung zielt auf die Senkung der Flammentemperatur durch die kühlende Wirkung der Abgase und somit die Vermeidung von thermischen Stickoxiden ab. Weiterhin erfolgt eine Verdünnung, die zu verminderten Sauerstoffpartialdrücken führt. Somit werden die Reaktionsbedingungen für thermische Stickoxide verschlechtert. Der apparative Aufwand für die Luftführung ist jedoch hoch und erscheint für Kleinkesselanlagen bisher unrealistisch. Darüber hinaus spielt die thermische  $\text{NO}_x$ -Bildung bei Kleinfeuerungsanlagen nur eine untergeordnete Rolle.

Sekundärmaßnahmen zur Stickstoffminderung beruhen auf der Zugabe eines stickstoffhaltigen Reduktionsmittels, um bereits gebildete Stickoxide zu molekularem Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) reagieren zu lassen. Gebildete Stickoxide können durch selektive nicht katalytische Reduktion (SNCR) oder selektive katalytische Reduktion (SCR) aus dem Abgas entfernt werden. Beim SNCR-Verfahren erfolgt eine Eindüsung von Ammoniak oder Harnstoff im Temperaturbereich von 850 bis 950°C in die Brennkammer. Dadurch lassen sich geeignete  $\text{NO}_x$ -Abbaureaktionen mit Reduktionsgraden zwischen 60 und 70 % erreichen. Beim SCR-Verfahren werden die abgekühlten Abgase unter Zugabe von Ammoniak durch einen Katalysator geleitet, in welchem der Abbau zu molekularem Stickstoff erfolgt. Bei der Anwendung dieses Verfahrens für die Verbrennung von Biomasse besteht jedoch die Gefahr der Deaktivierung des Katalysators durch eventuell enthaltene Alkaliverbindungen. Die Anwendbarkeit und Wirtschaftlichkeit für kleine Biomassefeuerungsanlagen konnte bislang noch nicht nachgewiesen werden.

Die Minderung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen ist bei den Kleinfeuerungsanlagen vor allem wegen der umfangreichen konstruktiven Änderungen im Abgassystem der Kesselanlagen wirtschaftlich nicht darstellbar. Es werden momentan aber Entwicklungsarbeiten zu diesem Thema (insbesondere katalytisch wirksame Kesselauskleidungen) forciert.

Einen weiteren innovativen Ansatzpunkt stellt der Einsatz eines Calciumaluminat-Katalysators dar, der ursprünglich für die katalytische Oxidation von methanhaltigen Schwachgasen aus Deponien entwickelt wurde. Im Rahmen mehrerer Forschungsvorhaben konnte die Reduzierung von CO- und  $\text{NO}_x$ -Emissionen erfolgreich nachgewiesen werden /36/.

Die zwischenzeitlich entwickelten Porenbrenner (z. B. FLOX Brenner) reduzieren die Bildung von Stickoxiden, indem die Verbrennungsreaktion flammenlos abläuft. Die technische Machbarkeit für diese Konzepte für Biomassefeuerungen werden gegenwärtig von mehreren Instituten (IVD/TFZ; FH Bingen) und Firmen (Fa. Mothermik, Fa. WS Feuerungstechnik) in verschiedenen FNR Projekten getestet.

#### 2.4.3.4 Schwefeldioxid – Messergebnisse, Abhängigkeit vom Schwefelgehalt

Es wird deutlich, dass beim Einsatz sämtlicher untersuchter Brennstoffe und Anlagen, mit Ausnahme von Rapskörnern, mittlere Emissionswerte von maximal 450 mg/m<sup>3</sup> erreicht werden (s. Abb. 49 bis 54). Vergleicht man die Brennstoffe untereinander, so kann festgestellt werden, dass analog zu den Stickoxidemissionen auch in Bezug auf die Mittelwerte der Schwefeldioxidemissionen mit deutlich unter 50 mg/m<sup>3</sup> die geringsten Emissionsniveaus bei den holzartigen Brennstoffen nachzuweisen sind. Mittlere Emissionsniveaus von 50 bis 300 mg/m<sup>3</sup> erreicht man mit Brennstoffmischungen bzw. Strohpellets. Bei Getreidekörnern liegt dieses Niveau mit 150 bis 450 mg/m<sup>3</sup> etwas höher, wobei die höchsten Werte in allen Anlagen bei Winterweizen und Hafer festgestellt wurden. Winterroggen, Wintergerste und Wintertriticale verursachen etwas niedrigere Schwefeldioxidemissionen. Eine Ausnahme bildet der Winterraps. Hier zeigt sich, dass die hohen Schwefelanteile der Rapskörner auch zu deutlich erhöhten Schwefeldioxidemissionen führen.

Die ermittelten Zusammenhänge zwischen den Schwefelgehalten der Brennstoffe und den SO<sub>x</sub>-Emissionen zeigen für alle untersuchten Anlagen signifikante, positive Korrelationen (s. Abb. 55 bis 58). Schwefeldioxide werden im Rahmen des Geltungsbereiches der 1. BImSchV nicht reglementiert. Zieht man für eine Bewertung jedoch die höheren Anforderungen der TA Luft heran, kann beim Einsatz von naturbelassenen Brennstoffen **mit Schwefelgehalten bis etwa 0,2 % in der TM von einer sicheren Einhaltung der mit 0,35 g/m<sup>3</sup> (11 % O<sub>2</sub>-Bezug) aufgeführten Emissionsgrenzwerten ausgegangen werden**. Neben Raps kann es bei Getreidekörnern, speziell bei Weizen bzw. Hafer sowie Mühlennebenprodukten zu Überschreitungen des TA Luft Grenzwertes kommen. (s. Abb. 5 und Tab. 6 bis 8).

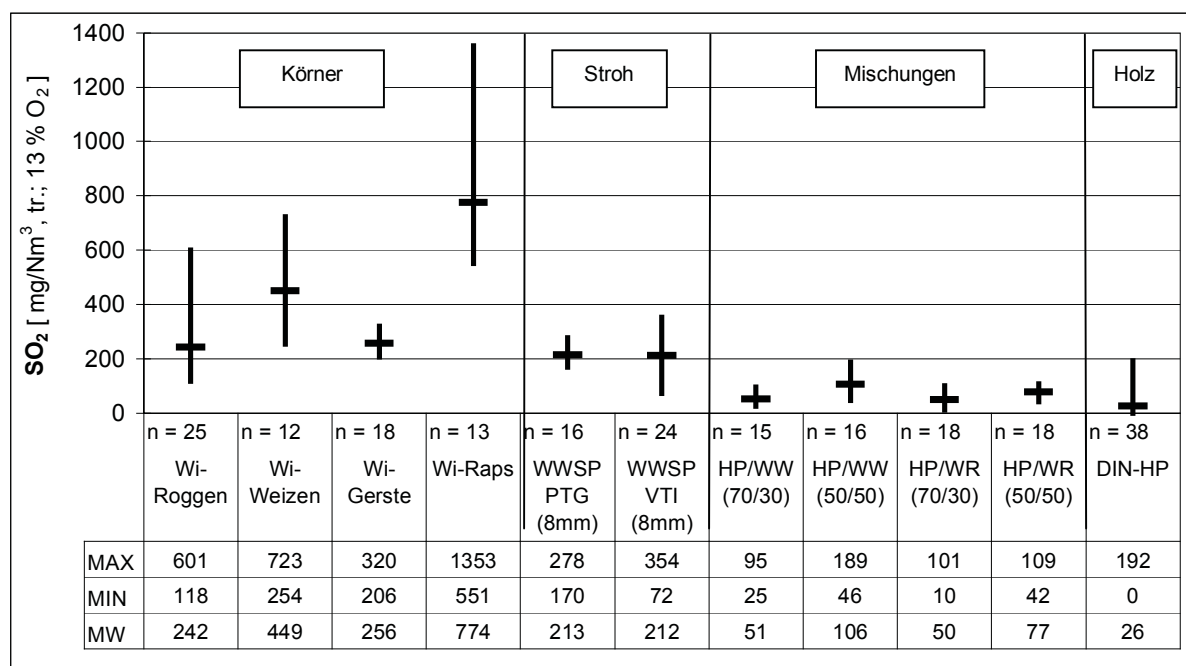


Abbildung 49: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

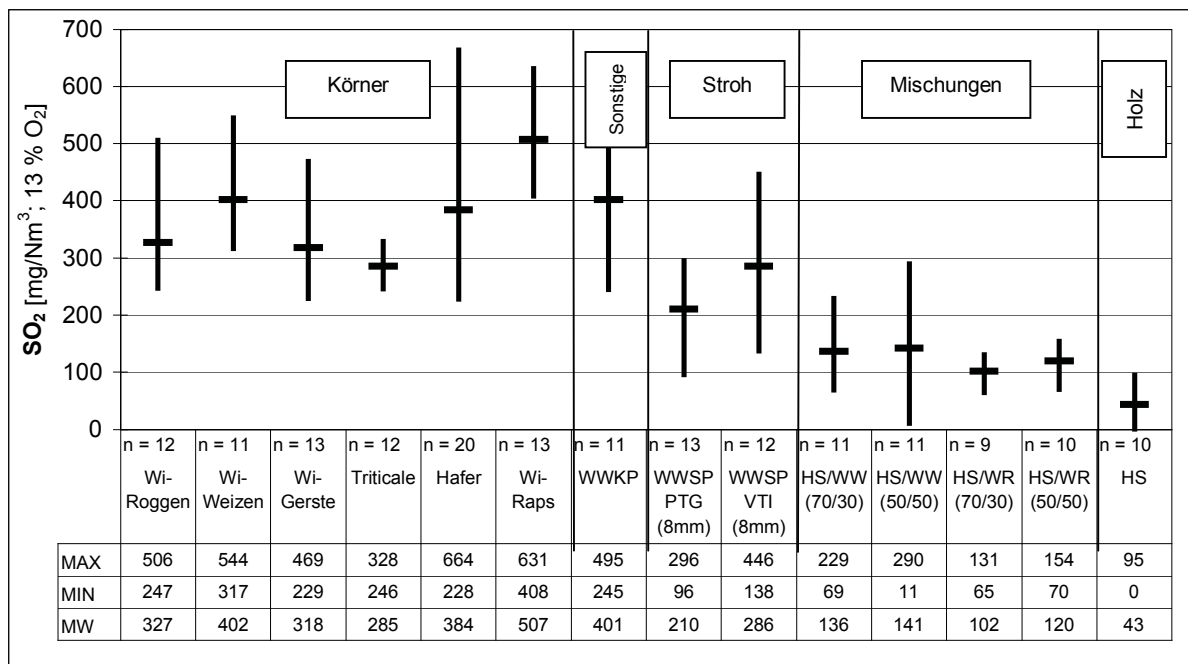


Abbildung 50: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

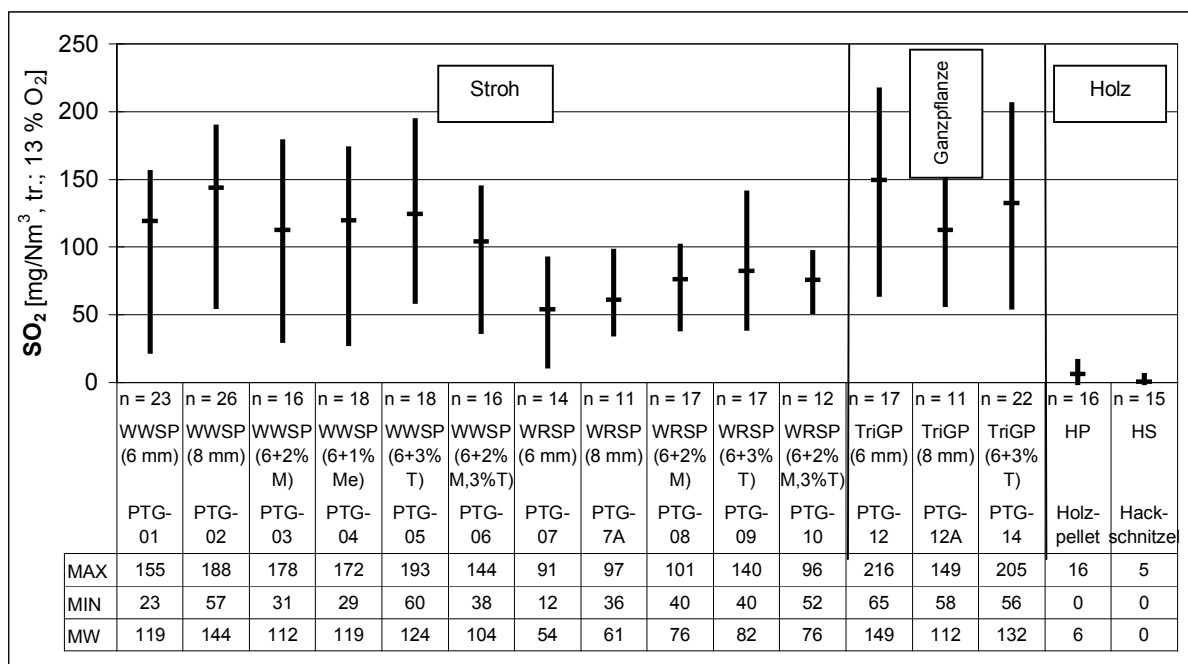


Abbildung 51: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

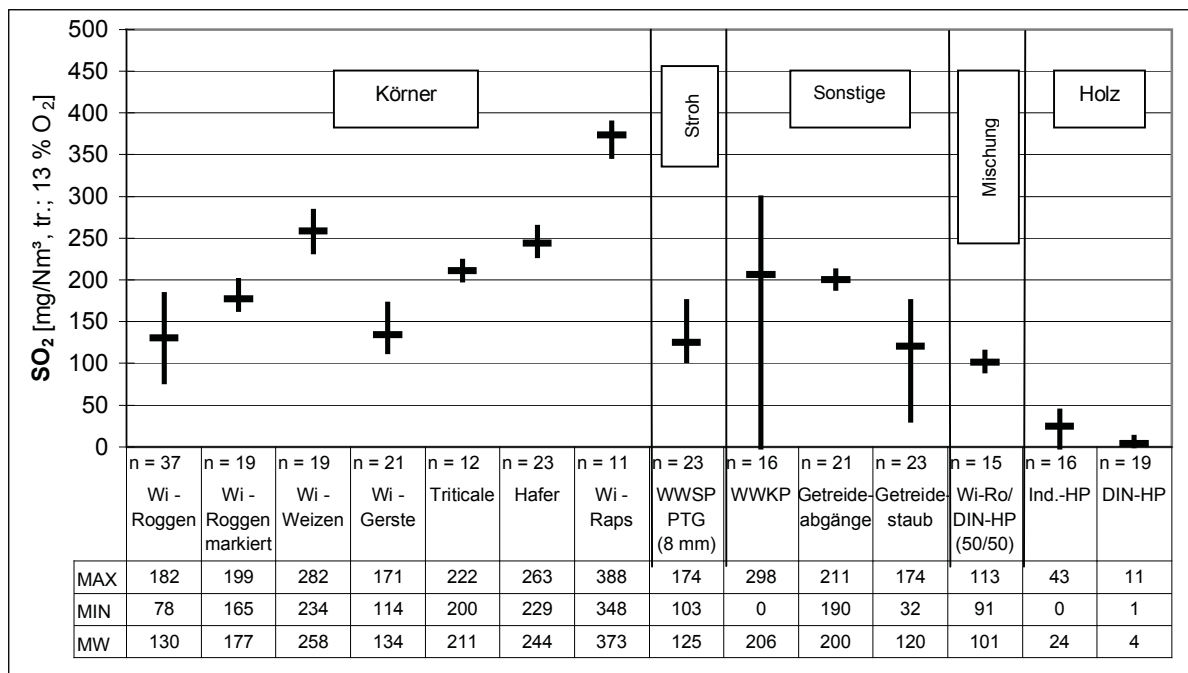


Abbildung 52: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

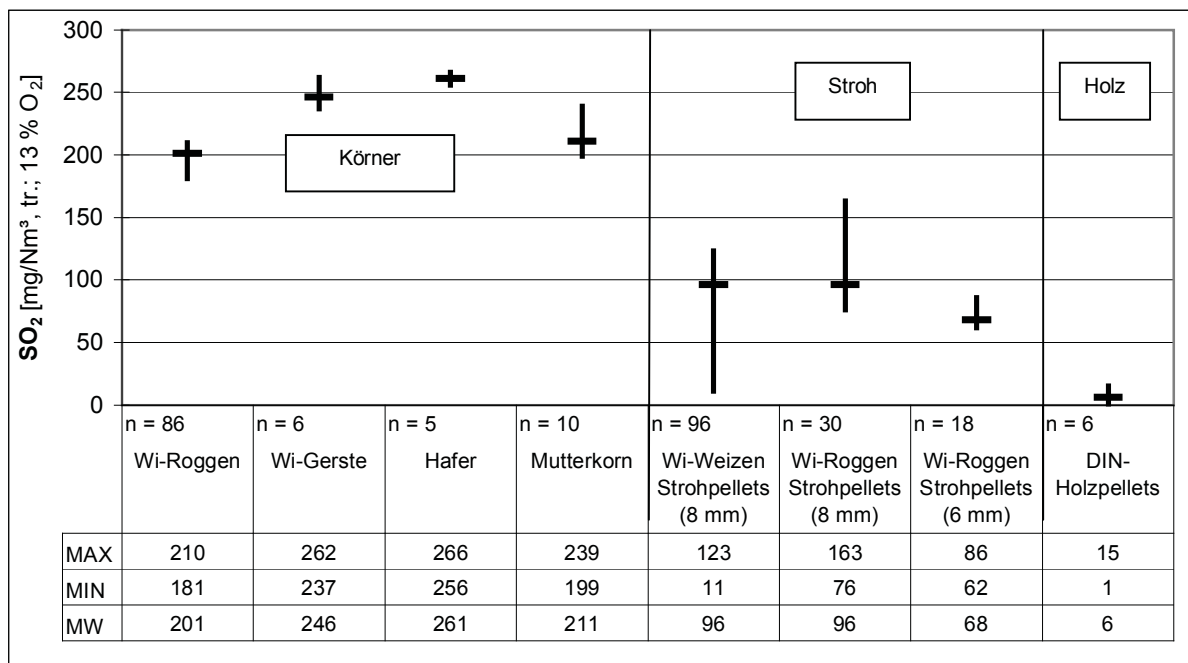


Abbildung 53: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflamm GmbH – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

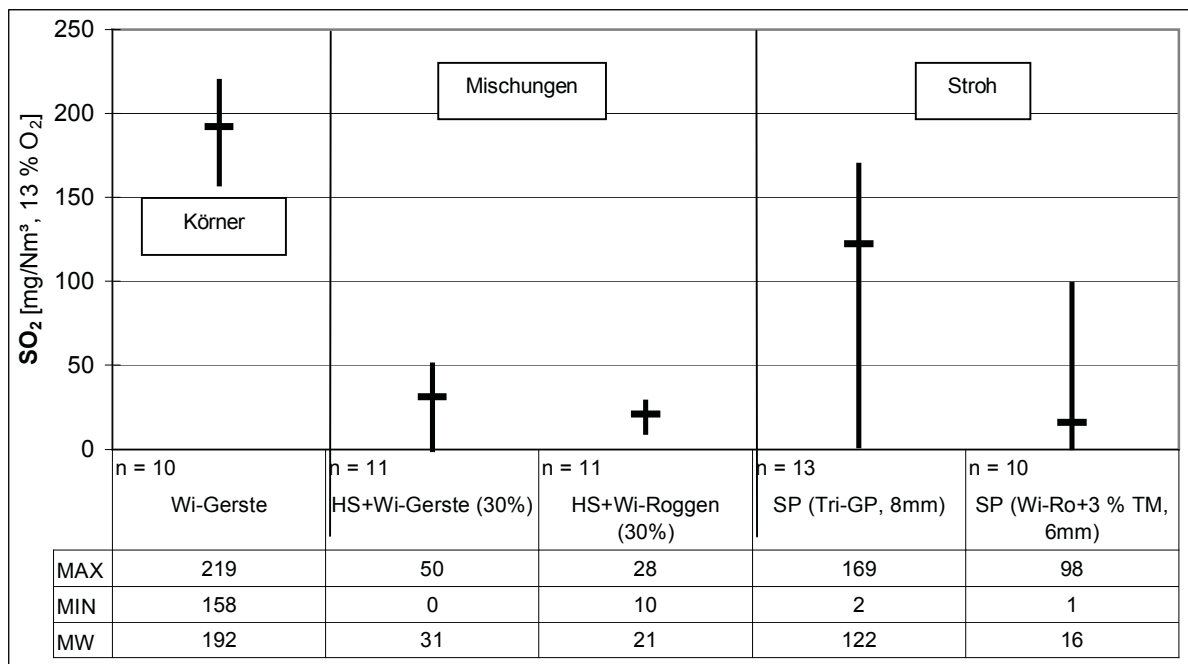


Abbildung 54: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am 900 kW Kessel, Fa. Ökotherm GmbH – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

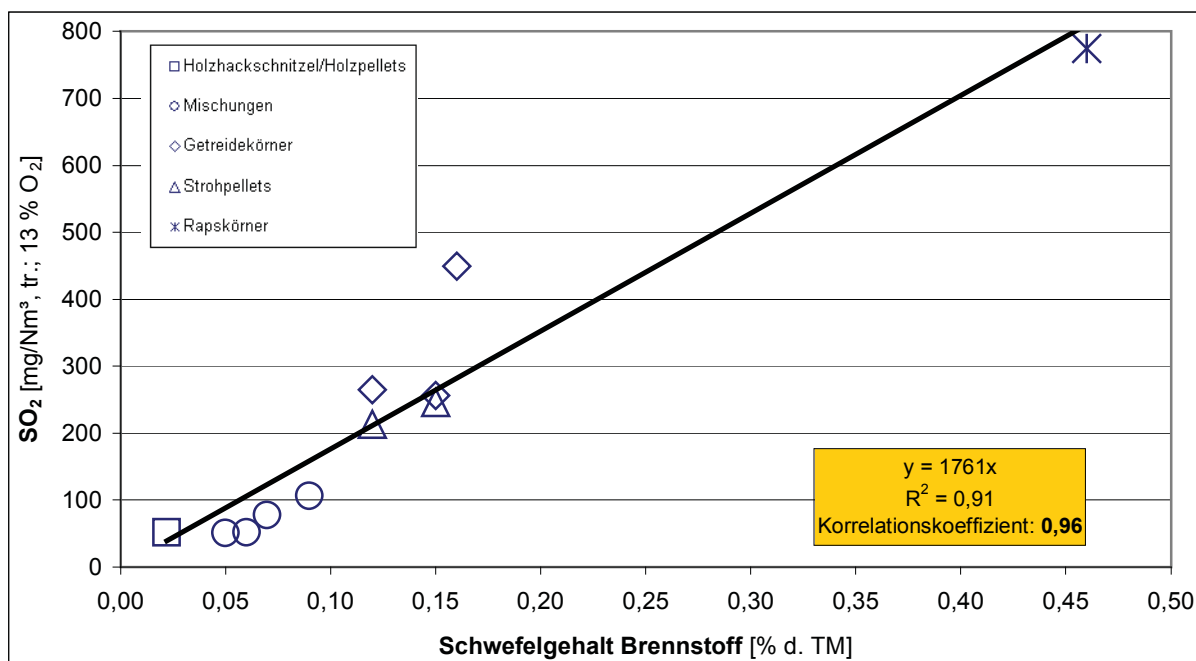


Abbildung 55: Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentrationen vom Schwefelgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH und Labordaten für den Schwefelgehalt – 2003/04; Schwefeldioxidwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

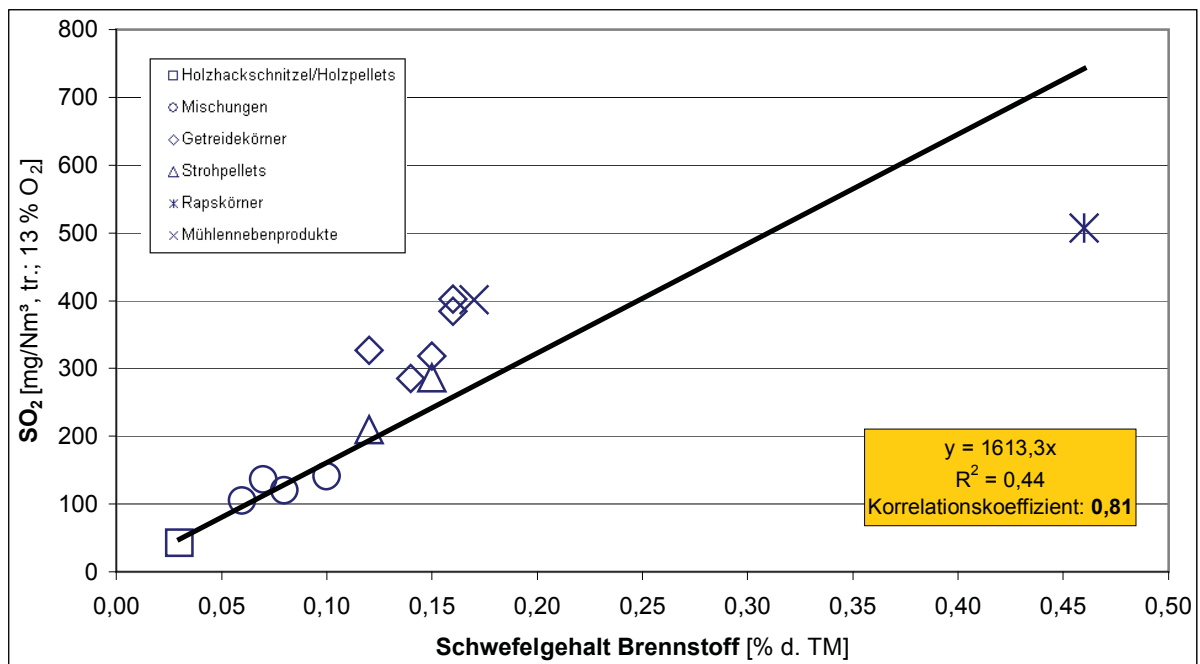


Abbildung 56: Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentrationen vom Schwefelgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S und Labordaten für den Schwefelgehalt – 2003/04; Schwefeldioxidwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

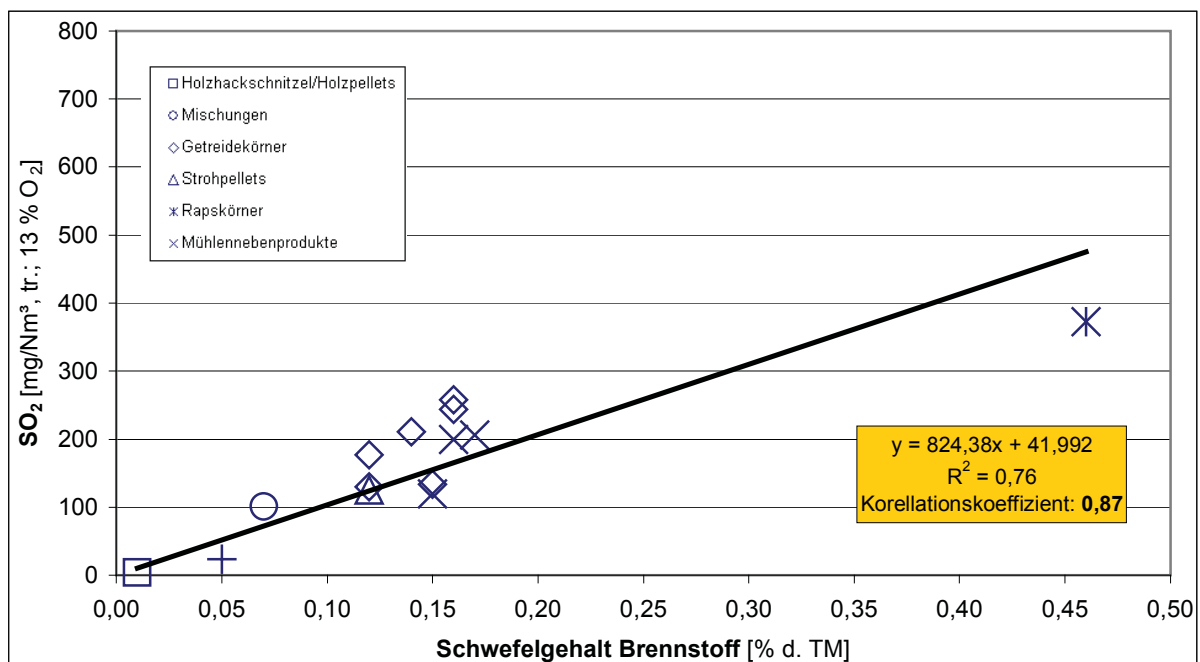


Abbildung 57: Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentrationen vom Schwefelgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S und Labordaten für den Schwefelgehalt – 2003/04; Schwefeldioxidwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

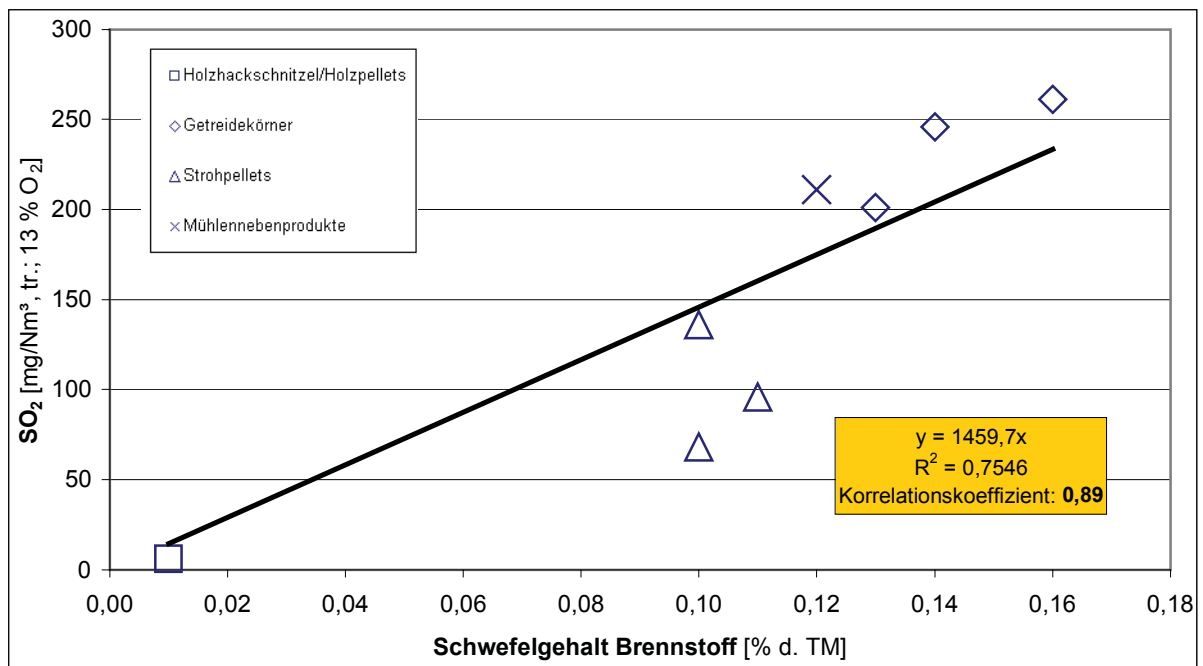


Abbildung 58: Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentrationen vom Schwefelgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflam GmbH und Labordaten für den Schwefelgehalt – 2004/05; Schwefeldioxidwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen



#### 2.4.3.5 Chlorwasserstoff (HCl) – Messergebnisse, Abhängigkeit vom Chlorgehalt

Die untersuchten Feuerungsanlagen zeigen, neben deutlichen brennstoffbedingten, auch anlagenspezifische Unterschiede bei den ermittelten Konzentrationen an HCl (s. Abb. 59 bis 65). Bei den Versuchen mit den holzartigen Referenzbrennstoffen Holzhackschnitzel und Holzpellets wurden, mit Ausnahme einer Einzelmessung des IE an der Ferro Anlage (s. Abb. 59), welche als Ausreißer gesehen werden muss, Konzentrationen kleiner  $10 \text{ mg/m}^3$  ermittelt und somit erwartungsgemäß die niedrigsten HCl-Gehalte bei allen untersuchten Feuerungsanlagen. Bei der Verbrennung von Körnerchargen war neben höheren Konzentrationen auch die Schwankungsbreite der Einzelmessungen wesentlich größer als bei den Referenzbrennstoffen. Während bei Betrachtung der Mittelwerte in der Regel  $30 \text{ mg/m}^3$  sicher erreicht wurden, kam es bei Einzelmessungen an der Baxi Anlage zu Konzentrationen von bis zu  $65 \text{ mg/m}^3$  (s. Abb. 63).

Für Strohpellets wurden besonders für die Einstreustrohpellets mit im Mittel  $50 \text{ mg/m}^3$ , analog zu den Erfahrungen früherer Untersuchungen, generell höhere HCl-Konzentrationen festgestellt [12/, /35/]. Im Fall der untersuchten Charge an der Baxi Anlage wurden sogar Werte um  $100 \text{ mg/m}^3$  nachgewiesen. Die für eine energetische Verwertung speziell erzeugten Strohpellets konnten in Bezug auf die HCl-Emissionen deutlich niedrigere Emissionsniveaus in einer Bandbreite von 5 bis  $26 \text{ mg/m}^3$  für alle 42 durchgeführten Messungen festgestellt werden (s. Abb. 61).

Ein Betrieb im Teillastbereich führte zu deutlichen Reduzierungen der entstehenden HCl-Emissionen mit bis zu 50 % für Winterweizenkörner bzw. bis zu 75 % für Strohpellets (s. Abb. 62). Durch die Senkung der Strömungsgeschwindigkeit im Abgassystem kann von einer niedrigeren Abgastemperatur mit zunehmender Kondensation ausgegangen werden.

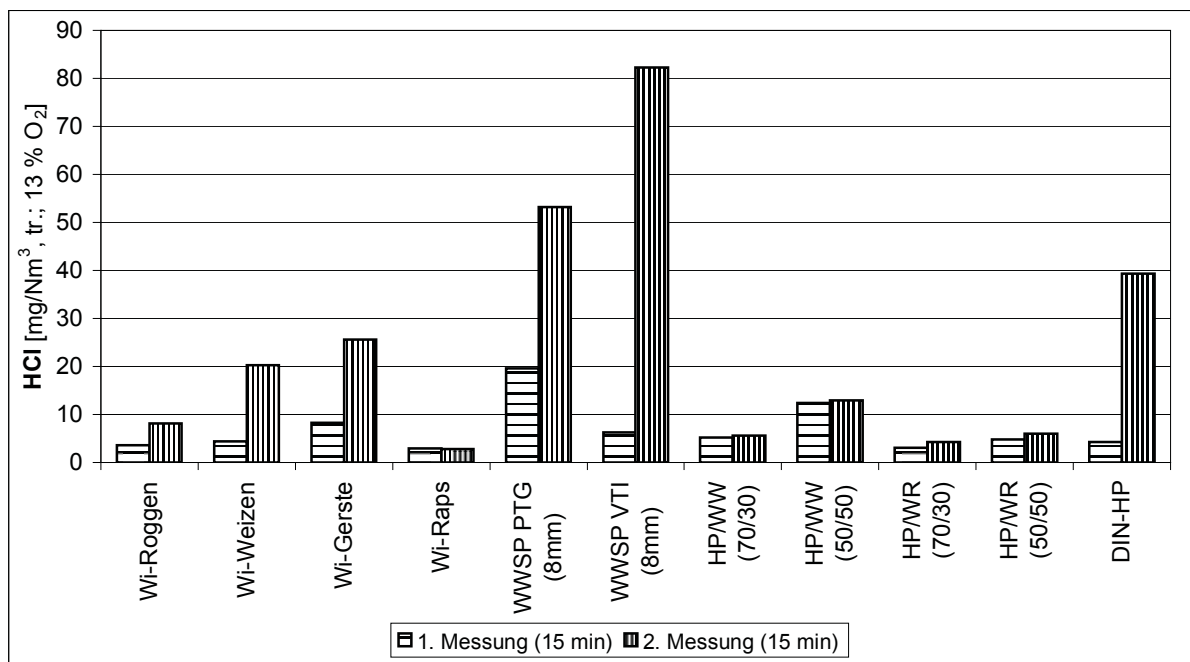


Abbildung 59: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am, BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

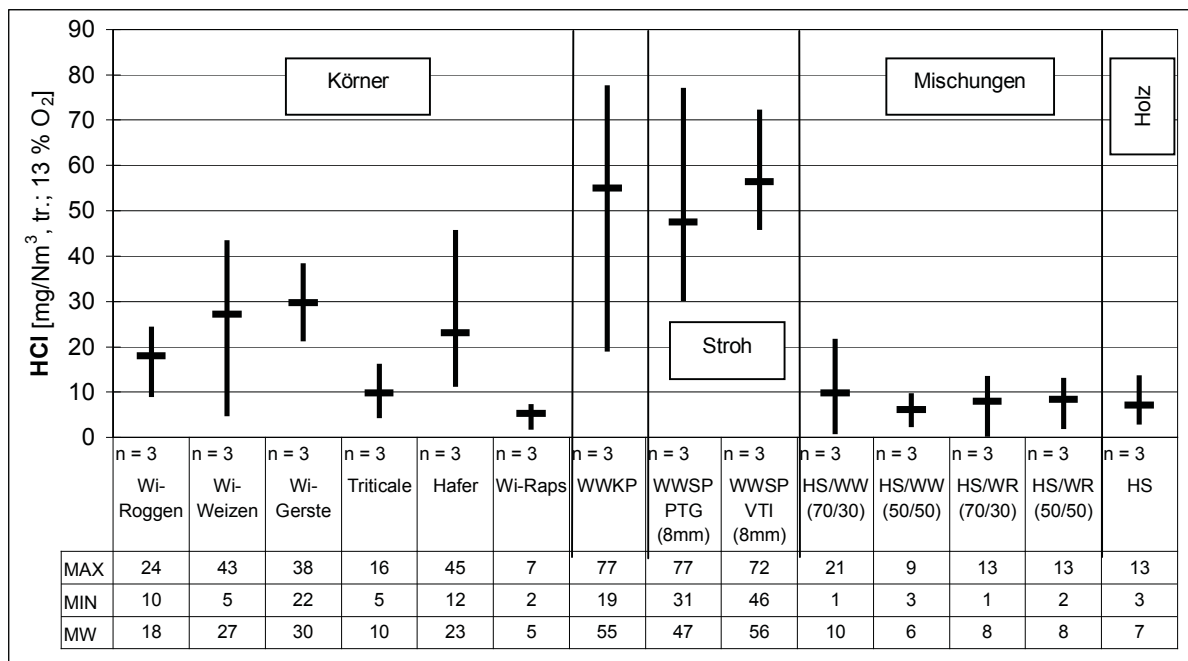


Abbildung 60: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

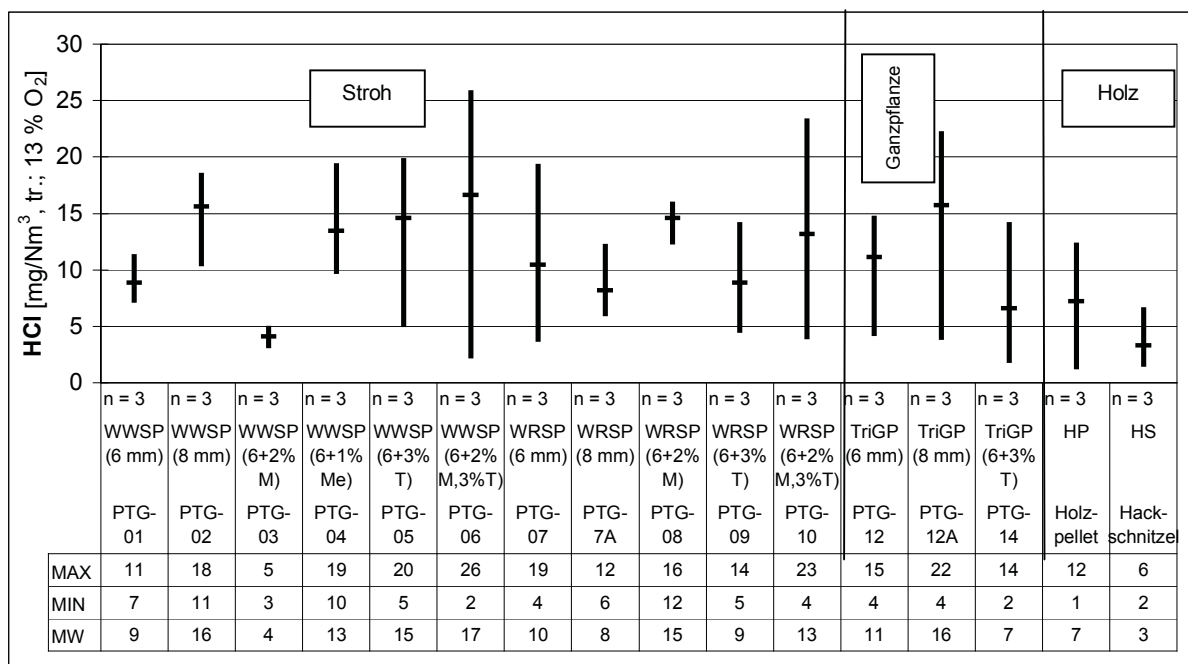


Abbildung 61: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2004/05; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

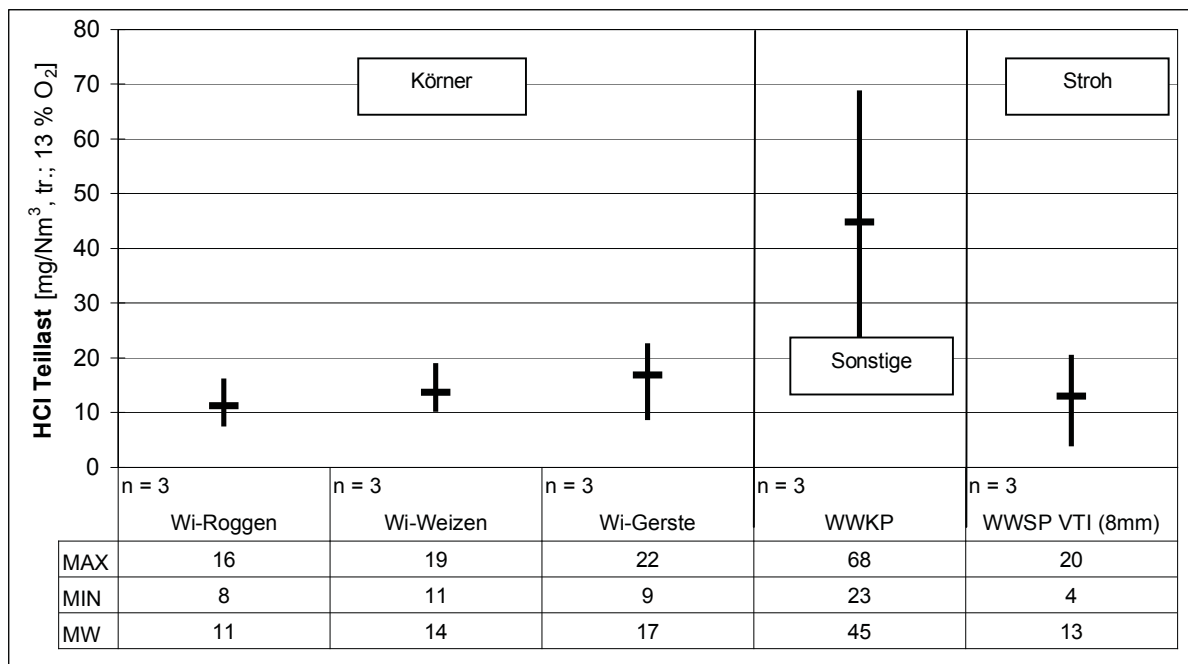


Abbildung 62: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen im Teillastbereich – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

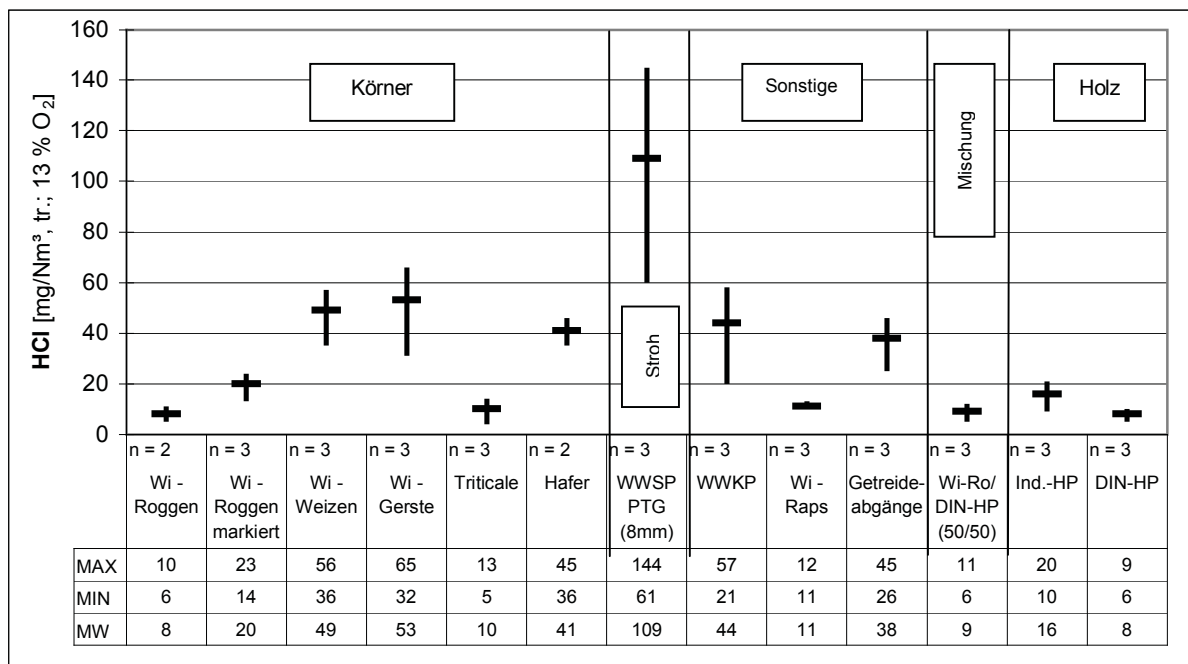


Abbildung 63: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT Modell 2,5; Fa. BAXI A/S – 2003/04; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

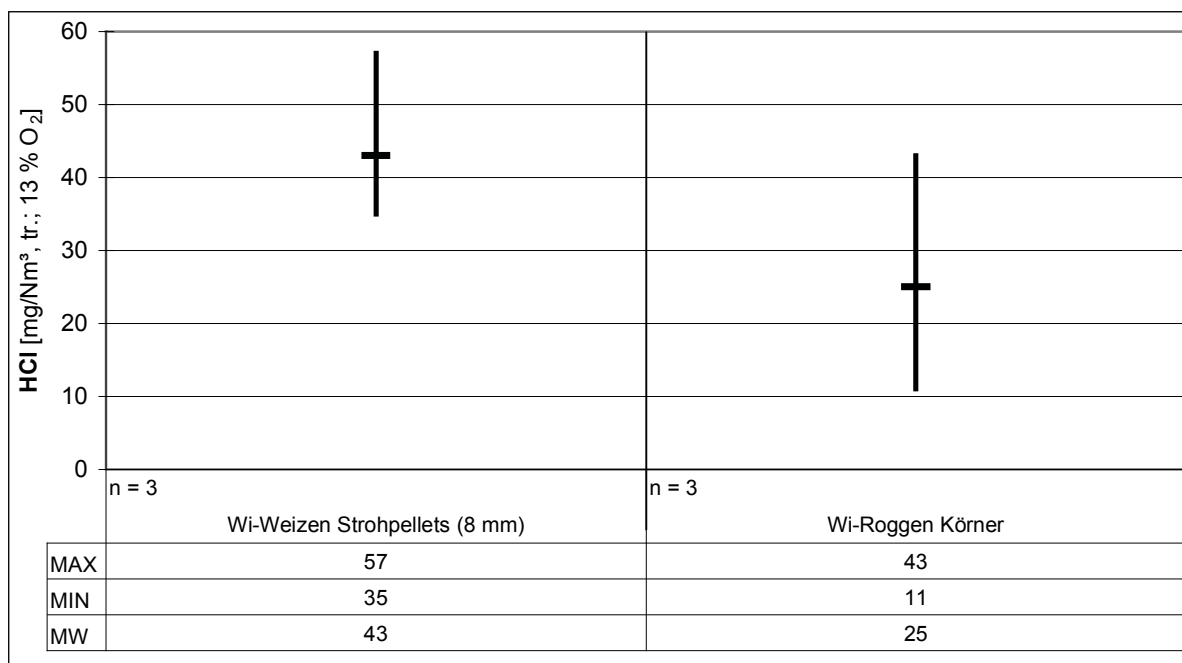


Abbildung 64: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen verschiedener halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflam – 2004/05; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

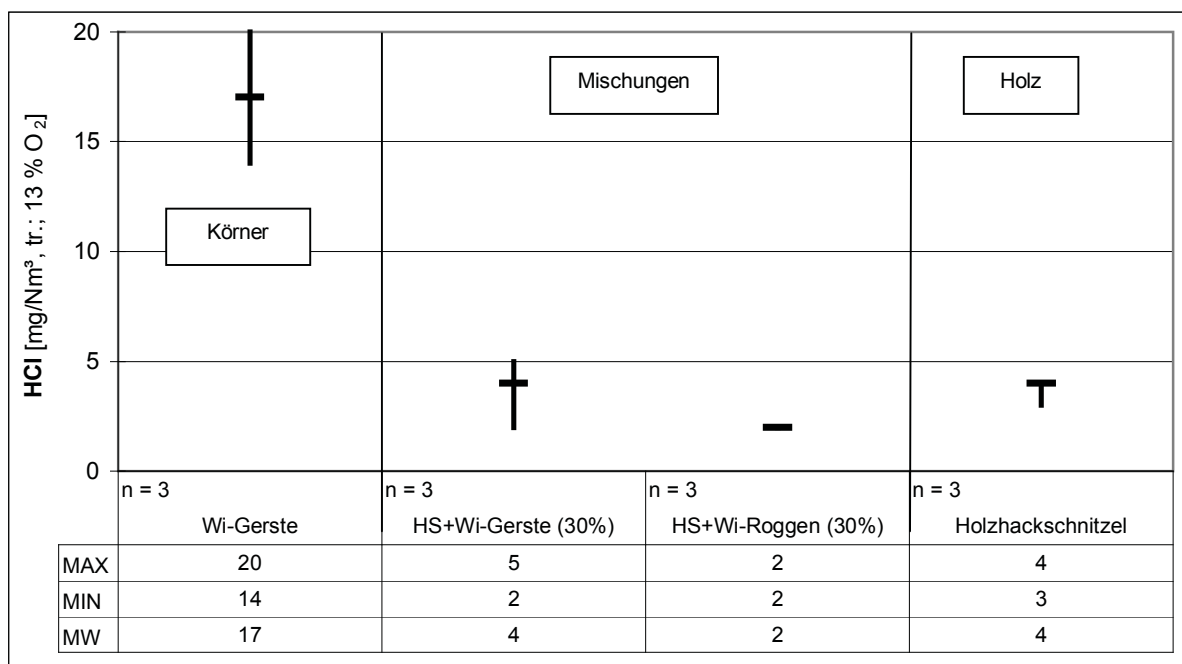


Abbildung 65: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am 900 kW Kessel, Fa. Ökotherm GmbH – 2004/05; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

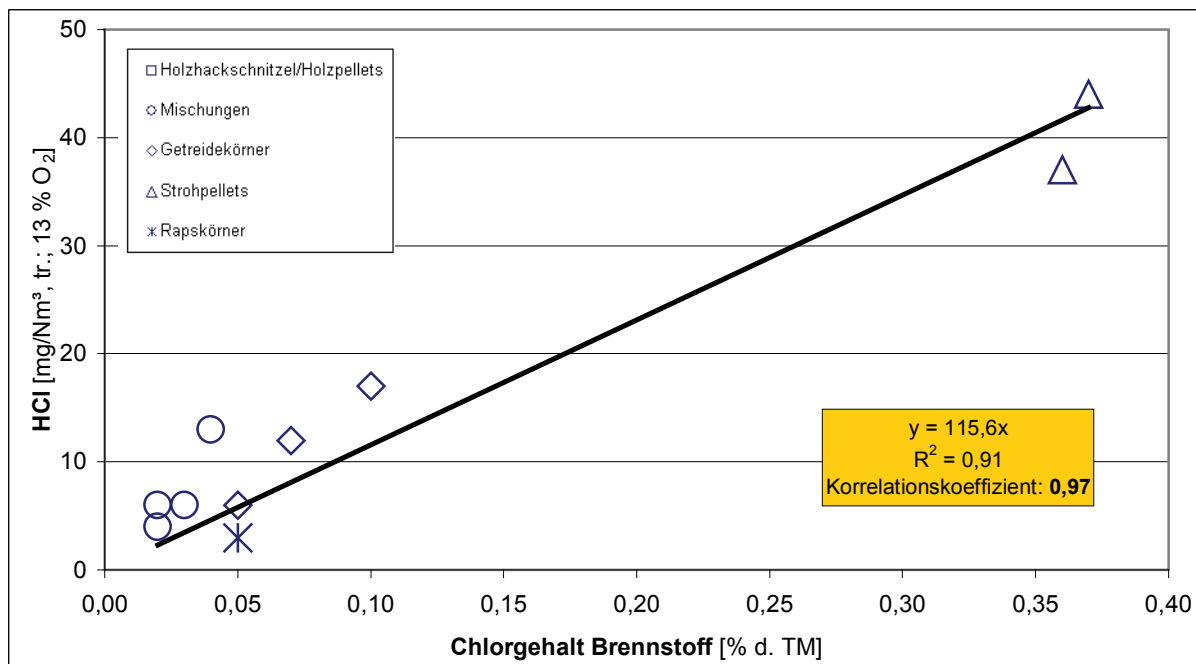


Abbildung 66: Abhängigkeit der Chlorwasserstoffkonzentrationen vom Chlorgehalt im Brennstoff im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH und Labordaten für den Chlorgehalt – 2003/04; Chlorwasserstoffkonzentrationen angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

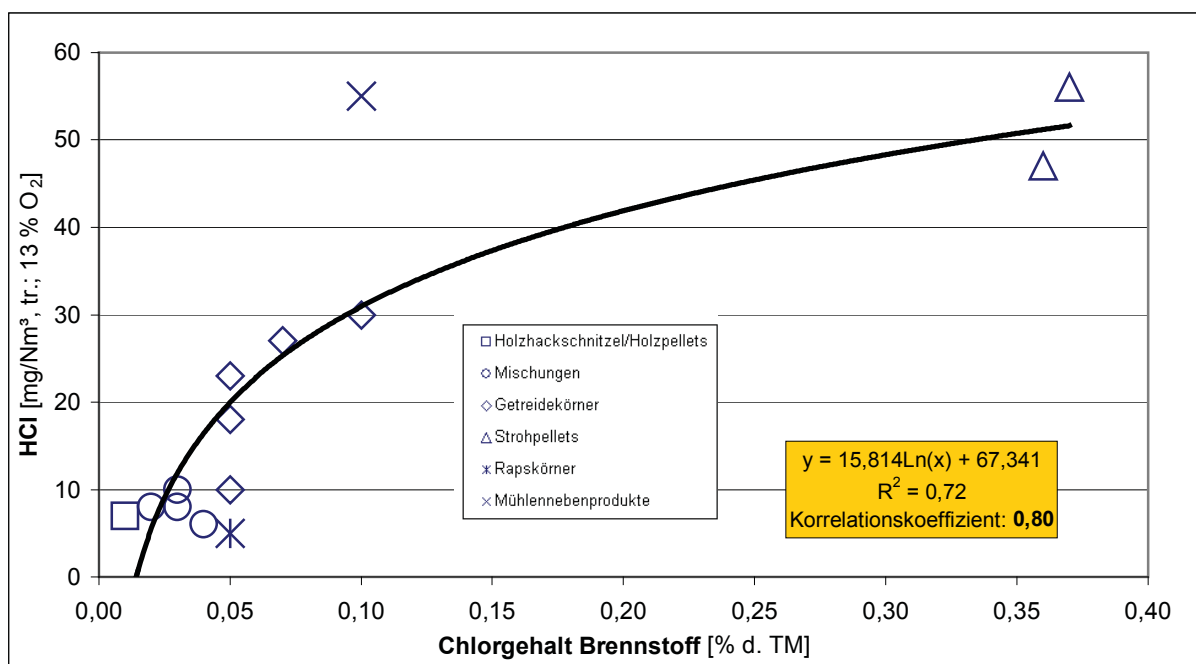


Abbildung 67: Abhängigkeit der Chlorwasserstoffkonzentrationen vom Chlorgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S und Labordaten für den Chlorgehalt – 2003/04; Chlorwasserstoffkonzentrationen angegeben als Mittelwert der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

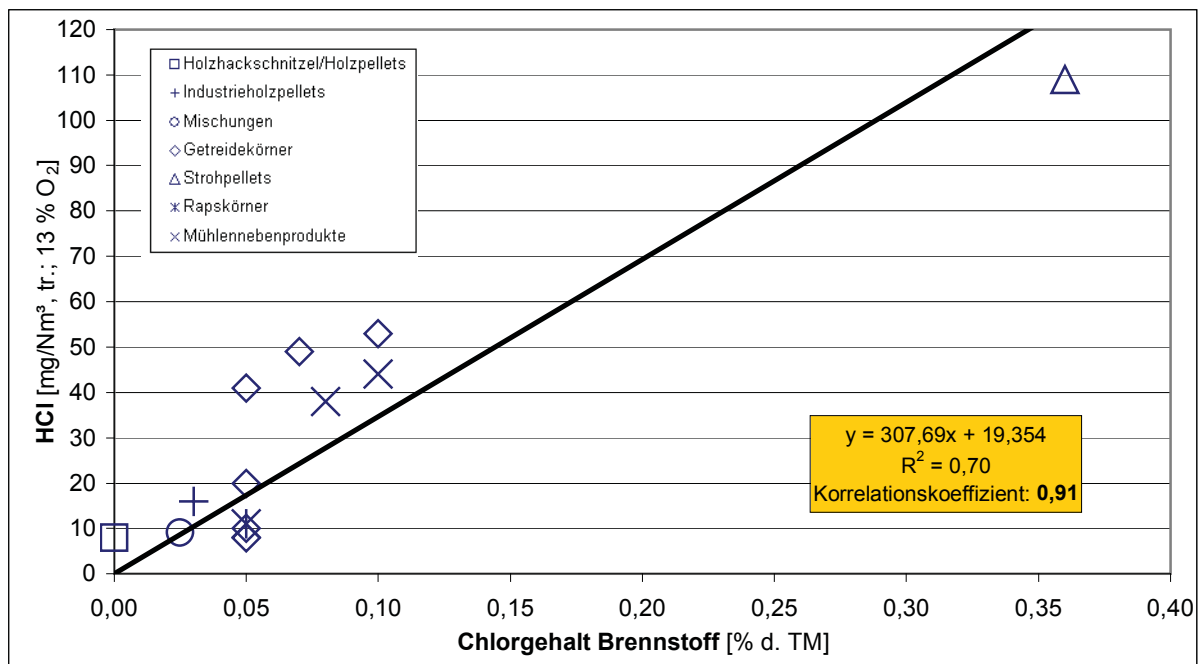


Abbildung 68: Abhängigkeit der Chlorwasserstoffkonzentrationen vom Chlorgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S und Labordaten für den Chlorgehalt – 2003/04; Chlorwasserstoffkonzentrationen angegeben als Mittelwert der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

In Bezug auf die entstehenden Chlorwasserstoffemissionen wird deutlich, dass in allen untersuchten Kleinfeuerungsanlagen mit zunehmender Konzentration von Chlor im Brennstoff in enger Korrelation auch die Chlorwasserstoffemissionen zunehmen (s. Abb. 66 bis 68). Dies bestätigt die festgestellten Tendenzen bei Rohgasuntersuchungen der TLL/TLUG zum Emissionsverhalten bei Strohverbrennungsanlagen  $> 1.000 \text{ kW}_{\text{th}} / 37/$ . Es deutet aber auch darauf hin, dass neben den Chlorgehalten im Brennstoff, die Leistungsklasse der Anlagen, die Laststufe aber auch die Feuerraumgeometrie und die Qualität der Verbrennung zu unterschiedlichen Ascheeinbindungsraten des Chlors führen und somit die HCl-Konzentrationen im Abgas beeinflussen.

**Legt man für eine Bewertung der HCl-Emissionskonzentrationen die Anforderungen der 4. BImSchV und damit der TA Luft mit einem Grenzwert von  $30 \text{ mg/m}^3$  für Anlagen  $< 1 \text{ MW}_{\text{th}}$  (bezogen auf einen Restsauerstoffgehalt im Abgas von 11 %) zugrunde, wird deutlich, dass dieser nur von Brennstoffen mit maximalen Chlorgehalten von etwa 0,10 % i. d. TM eingehalten werden kann.** Daraus folgt, dass bei Halmgutpellets, Mühlennebenprodukten und Getreidekörner-chargen, speziell bei Hafer und Gerste, sowie bei Triticaleganzpflanze mit Überschreitungen dieses Wertes zu rechnen ist (s. Abb. 6 und Tab. 6 bis 8).

### 2.4.3.6 Dioxine, Furane (PCDD/F)/Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

In Bezug auf krebserzeugende, erbgutverändernde oder reproduktionstoxische Stoffe wurden zusätzlich zum eigentlichen Untersuchungsprogramm für die Brennstoffe Winterweizenstrohpellets und Winterroggenkörner in je drei Einzelmessungen die Konzentrationen an PCDD/F und PAK (16 EPA) im Rohgas der Agroflam Feuerungsanlage bestimmt. Die Ergebnisse zeigen dabei erwartungsgemäß mit im Mittel  $0,355 \text{ ng/m}^3$  ( $n = 2$ ) beim Einsatz von Winterweizenstrohpellets höhere PCDD/F-Werte als bei der Verbrennung von Winterroggenkörnern ( $0,252 \text{ ng/m}^3$ ;  $n = 3$ ). Bei den Getreidekörnern wurde jedoch eine mit Faktor 2,8 wesentlich größere Schwankungsbreite nachgewiesen (s. Abb. 69 und 70).

Die Ergebnisse bestätigen frühere Untersuchungen zur steigenden Tendenz der Bildung von Dioxinen und Furanen bei höheren Brennstoffchlorgehalten und verdeutlichen die niedrigeren Werte für Getreidekörner gegenüber sonstigen Halmgütern /13/, /37/.

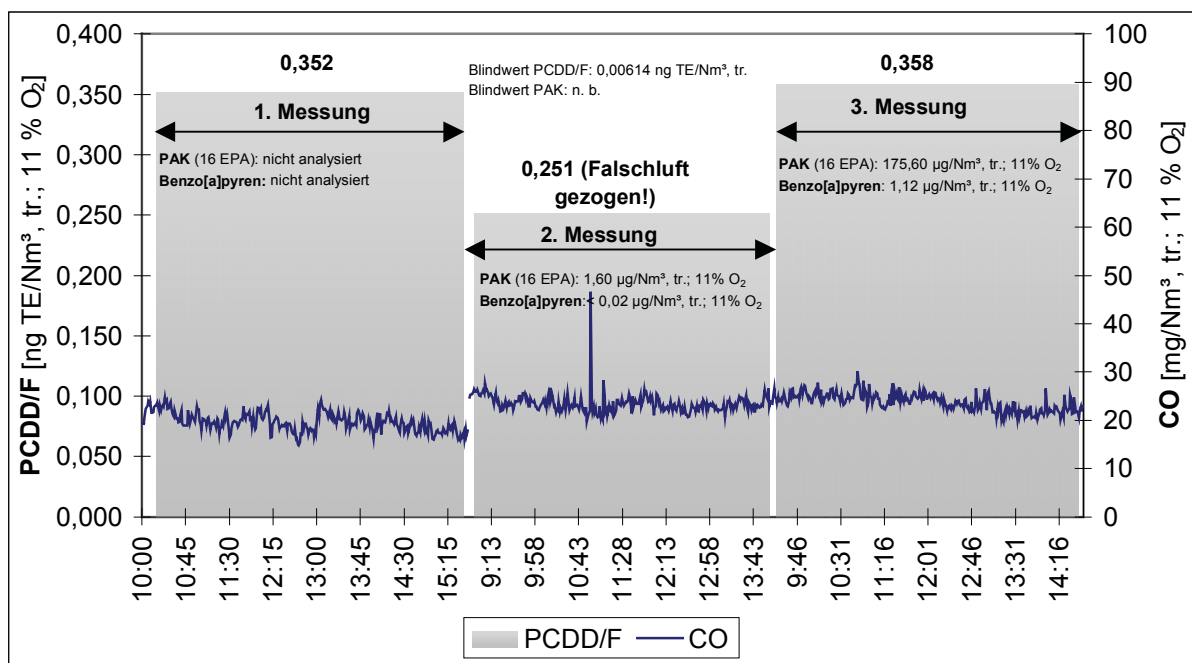


Abbildung 69: Gegenüberstellung der diskontinuierlich gemessenen Dioxin/Furan- und PAK-Gehalte mit den kontinuierlich gemessenen Konzentrationen an Kohlenmonoxid für den Brennstoff Weizenstrohpellets (8 mm) – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflam GmbH – 2004/05; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Legt man für eine Bewertung der PCDD/F-Emissionskonzentrationen die Anforderungen der TA Luft mit einem Emissionswert von  $0,1 \text{ ng/m}^3$  (bezogen auf einen Restsauerstoffgehalt im Abgas von 11 %) zu Grunde, wird deutlich, dass dieser bei beiden Brennstoffen überschritten wird.

Die ermittelten Konzentrationen der PAK lagen bei Winterweizenstrohpellets mit  $175,6 \mu\text{g/m}^3$  ( $n = 1$ ) und für Winterroggenkörner mit  $22,9 \mu\text{g/m}^3$  ( $n = 3$ ) (bezogen auf einen Restsauerstoffgehalt von 11 % im trockenem Abgas) auf dem Niveau früherer Messungen /13/. Die kompakte Form der Brennstoffe, welche eine sehr gute Brennstoffdosierung ermöglicht, begünstigt neben sehr guten Abbrandergebnissen die nur geringe Bildung von PAK-Emissionen.

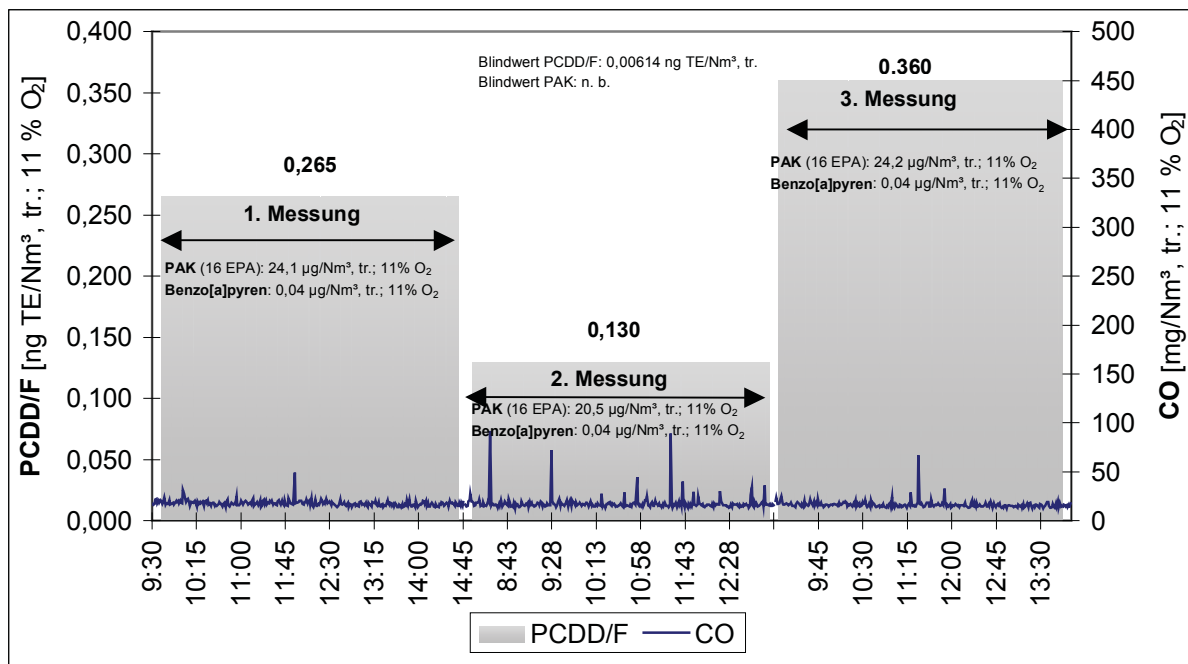


Abbildung 70: Gegenüberstellung der diskontinuierlich gemessenen Dioxin/Furan- und PAK-Gehalte mit den kontinuierlich gemessenen Konzentrationen an Kohlenmonoxid für den Brennstoff Winterroggenkörner – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflam GmbH – 2004/05; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Bei den Untersuchungen der PAK-Leitkomponente Benzo[a]pyren kann man bei Werten kleiner 1,2 µg/Nm³ (n = 5), bezogen auf einen Restsauerstoffgehalt von 11 % im trockenen Abgas, von einer sicheren Unterschreitung eines nach TA Luft herangezogenen maximal zulässigen Emissionswertes von 0,05 mg/m³ ausgehen.

*Zusammenfassend muss festgehalten werden, dass in Bezug auf die Dioxin- und Furangehalte im Rauchgas bislang nur einige wenige wissenschaftliche Orientierungsmessungen vorgenommen wurden. Der gesamte Stichprobenumfang umfasste nur wenige Messungen. Es ist weiterhin nicht endgültig geklärt, ob das Messverfahren nach TA Luft im Bereich der Kleinf Feuerungsanlagen im Praxisbetrieb so angewendet werden kann. Die bisher ermittelten Werte können nicht für eine genehmigungsrelevante Beurteilung entsprechend den Anforderungen der TA Luft (allgemeiner Teil) herangezogen werden. Zur Zeit ist keine gesicherte Aussage zur Messunsicherheit möglich. Gemessene Werte für Getreidekörner zeigen Schwankungsbreiten von 0,01 ng TE/Nm³ bis 0,35 ng TE/Nm³. Obwohl die bei Holz-, Getreide- und Strohfeuerungen nach TA Luft in Betracht kommenden Massenstromschwellen nicht zur Anwendung kommen, sind die eher geringen Massenströme bei den betrachteten Kleinf Feuerungsanlagen zu berücksichtigen. Bei den Ergebnissen der PCDD/F- und PAK-Messungen muss auf die geringe Datenbasis hingewiesen werden. Um allgemeingültige Aussagen treffen zu können, ist hier eine Erweiterung der Untersuchungen dringend erforderlich.*



## **Zusammenfassung**

Im Rahmen des FNR-Projektes „Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets“ lag neben der Eruierung möglicher Zuschlagstoffe zur Verbesserung der Brennstoffeigenschaften halmgutartiger Biomassen sowie der ökonomischen und ökologischen Bewertung der thermischen Verwertung landwirtschaftlicher Biomassen, der Schwerpunkt der Arbeiten bei der Feststellung des Standes der Verbrennungstechnik der Feuerungsanlagen. Dabei wurden umfangreiche Untersuchungen zum Emissionsverhalten von Körnerchargen, Halmgutpellets, Mischungen mit holzartigen Brennstoffen und Referenzbrennstoffen (Holzhackschnitzel und DIN-Holzpellets) durchgeführt.

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zur Verbesserung der Halmgutpelleteigenschaften resultierten in der Pelletierung von 14 unterschiedlichen Varianten in einer Praxisanlage sowie der Untersuchung ihres Emissionsverhaltens. Zur Beurteilung der einzelnen physikalisch-mechanischen sowie chemisch-stofflichen Eigenschaften wurden die einschlägigen deutschen und österreichischen Normen herangezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Normen nicht für Halmgutpellets geeignet sind. Davon unabhängig konnten hinsichtlich der Verringerung des Abriebs und bei der Erhöhung des Ascheschmelzpunktes signifikante Verbesserungen erzielt werden. Diese wurden in den Verbrennungsversuchen bestätigt.

Hinsichtlich des Standes der Technik der thermischen Verwertung von Getreide und Halmgutpellets in Kleinfeuerungsanlagen muss generell in konventionelle und neuartige Anlagentechnik unterschieden werden. Die speziell für holzartige Brennstoffe entwickelte konventionelle Verbrennungstechnik weist deutliche Unterschiede in Bezug auf die Funktionssicherheit und das Emissionsverhalten auf. Neben teilweise sehr guten Ausbrandergebnissen konnte keiner der konventionellen Kessel den Staubgrenzwertes nach 1. BImSchV einhalten. Hier ist der Einsatz von Sekundärmaßnahmen unabdingbar.

Demgegenüber ist bei speziell für die Verbrennung von Getreide entwickelten neuartigen Techniken die Einhaltung eines Staubwertes von  $100 \text{ mg/Nm}^3$ , bezogen auf 13 % Sauerstoff, sicher möglich. Dies entspricht einer Unterschreitung des Grenzwertes der 1. BImSchV von über 30 %. Noch deutlicher werden die Verbesserungen hinsichtlich der Kohlenmonoxidemissionen. Hier sind Werte kleiner  $50 \text{ mg/Nm}^3$  nachweisbar. Dies entspricht einer Unterschreitung des Grenzwertes um ca. 99 %. Für Halmgutpellets sind die Schwankungsbreiten größer und die ermittelten Emissionsniveaus geringfügig höher.

Erste Ergebnisse der nach TA Luft geforderten Emissionsparameter zeigen erhöhte Konzentrationen, insbesondere bei den ermittelten Stickoxidemissionen. Neben einer Grenzwertbetrachtung sollte hier jedoch immer auch die Massenstromgrößenordnung in Betracht gezogen werden.

Die Ergebnisse bilden die Grundlage für das aktuell laufende und von der FNR geförderte Verbundprojekt. Diese Projekte sollen für eine Erweiterung der Datenbasis als Grundlage für eine mögliche rechtliche Einordnung von Getreidekörnern als Regelbrennstoff der 1. BImSchV dienen.

## Literaturverzeichnis

- /1/ ÖNORM M 7135 (1998): Presslinge aus naturbelassenem Holz oder naturbelassener Rinde – Pellets und Briketts, Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.), Eigenverlag, Wien, 9 S.
- /2/ DIN 51731 (1996): Prüfung fester Brennstoffe – Preßlinge aus naturbelassenem Holz – Anforderungen und Prüfung. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 4 S.
- /3/ DINplus (2002): Zertifizierungsprogramm für Holzpellets zur Verwendung in Kleinfeuerungsstätten. Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH DIN CERTCO (Hrsg.), Eigenverlag, Berlin, 8 S.
- /4/ Guddat, C.; Schreiber, E. (2004): Landessortenversuche in Thüringen 2002 bis 2004 – Winterweizen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Eigenverlag, Jena, 42 S.
- /5/ Guddat, C.; Schreiber, E. (2004): Landessortenversuche in Thüringen 2002 bis 2004 – Wintergerste (mehrzeilig). Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Eigenverlag, Jena, 42 S.
- /6/ Guddat, C.; Schreiber, E. (2004): Landessortenversuche in Thüringen 2002 bis 2004 – Wintergerste (zweizeilig). Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Eigenverlag, Jena, 42 S.
- /7/ Guddat, C.; Schreiber, E. (2004): Landessortenversuche in Thüringen 2002 bis 2004 – Wintertriticale. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Eigenverlag, Jena, 42 S.
- /8/ Guddat, C.; Schreiber, E. (2004): Landessortenversuche in Thüringen 2002 bis 2004 – Sommerhafer. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Eigenverlag, Jena, 42 S.
- /9/ Guddat, C.; Schreiber, E. (2004): Landessortenversuche in Thüringen 2002 bis 2004 – Winterroggen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Eigenverlag, Jena, 42 S.
- /10/ Hartmann, H.; Böhm, T.; Maier, L. (2000): Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), Materialien Nr. 154, Eigenverlag, München, 130 S.
- /11/ Eltrop, L.; Hartmann, H.; Hering, T.; Härdtlein, M.; Kaltschmitt, M.; Kauter, D.; Kruck, C.; Lewandowski, I.; Pilz, M.; Puttkammer, T.; Thrän, D.; Unterberger, S.; Vetter, A. (2002): Standardisierung biogener Festbrennstoffe – Materialband zum Endbericht. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (Hrsg.), Eigenverlag, Stuttgart, 451 S.
- /12/ Vetter, A.; Wieser, P.; Mäusezahl, K.; Leiterer, M.; Rudolph, B.; Werner, A. (1995): Untersuchungen zum Einfluß der Brennstoffart und –qualität auf die Zusammensetzung der Reststoffe und deren Verwertung am Strohheizwerk Schkölen zur Sicherung der Umweltverträglichkeit. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Eigenverlag, Jena, 113 S.
- /13/ Launhardt, T.; Hartmann, H.; Link, H.; Schmid, V. (2000): Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinfeuerungsanlage – Emissionen und Aschequalität. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), Materialien Nr. 156, Eigenverlag, München, 132 S.

- /14/ Diverse (2001): Energetische Nutzung von Stroh Ganzpflanzengetreide und weiterer halmgutartiger Biomasse. In: Gülzower Fachgespräche, Band 17, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Eigenverlag, Gülzow, 143 S.
- /15/ Hering, T.; Kuhaupt, H.; Vetter, A. (2001): Prüfung der Gebrauchstauglichkeit von Markierungsmitteln bei Non-food Getreide und Darstellung der vorhandenen Feuerungstechniken. Verband für Agrarforschung und –bildung Thüringen e.V. (Hrsg.), Eigenverlag, Jena, 63 S.
- /16/ Anonymus (1997): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Kleinfeuerungsanlagen – 1. BImSchV). In: Umweltrecht, 11. Auflage, C. H. Beck Verlag, München, 873 S.
- /17/ Nendel, K.; Clauss, B. (2000): Herstellung von Briketts aus Halmgut für Feuerungsanlagen kleinerer Leistungen. In: Tagungsband zur 6. Internationalen Fachtagung „Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe“, 7.-8. September 2000 in Freiberg
- /18/ Obernberger, I. (1996): Erforderliche Brennstoffeigenschaften holz- und halmgutartiger Biomasse für den Einsatz in Großanlagen. In: Biomasse als Festbrennstoff, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 6, Landwirtschaftsverlag Münster, S. 122-154
- /19/ Kiesewalter, S.; Röhricht, C. (2003): Pelletierung von Stroh mit Zuschlagstoffen und Bindemitteln. In: KTBL Schrift 417, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag Münster, S 42-49
- /20/ Nicolaisen, L. et al (2002): Quality Characteristics of Biofuel Pellets. Danish Energy Agency file no.: 51161/00-0028, Eltra, PSO project no. 1996, Publication and print: Danish Technological Institute, 137 p.
- /21/ Steenari, B.-M.; Lindqvist, O. (1998): High temperature reactions of straw ahs and the anti-sintering additives kaolin and dolomite. From: Biomass and Bioenergy, Volume 14, Issue 1, p. 67-76
- /22/ Eggersgluß, W. (2003): Energetische Nutzung von Getreide in Kleinfeuerungsanlagen. In: KTBL Schrift 417, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag Münster, S 86-89
- /23/ Stöcklein, F. (2003): Messprogramm zur Begleitung des vorübergehenden Getreide-einsatzes in Feuerungsanlagen. Bericht Nr. 54537/1, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz , Eigenverlag, 69 S.
- /24/ Heidenreich, R.; List, M. (2003): Verbrennung von Strohpellets und Getreidekörnern in kleinen Kesseln. In: KTBL Schrift 417, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag Münster, S 66-74
- /25/ Hartmann, H. (2003): Verbrennungsverhalten und Emissionen bei der Nutzung von Getreidekörnern und Strohpellets als Brennstoff in Kleinfeuerungen. In: KTBL Schrift 417, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag Münster, S. 57-65
- /26/ Heidenreich, R.; List, M. (2003): Emissionen und Emissionsminderungsmaßnahmen bei der Verbrennung von Pellets aus halmartigen Biomassen.; 6 Kolloquium zur Reinhaltung der Luft: Neue Entwicklungen zur Technik der Luftreinhaltung, Dresden

- /27/ Beer, S. (2004): Entwicklung und Test einer Elektrofilteranlage für kleine Biomasseheizkessel. In: Tagungsband zum 13. Symposium „Energie aus Biomasse – Biogas, Flüssigkraftstoffe, Festbrennstoffe“, 25.-26.11., Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (Hrsg.), Eigenverlag, S. 283-285
- /28/ Heidenreich, R.: Persönliche Mitteilung, Juni 2004, Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Dresden
- /29/ Schulz (2004): persönliche Mitteilung, Firma Verfahrenstechnik Schulz
- /30/ Schmatloch, V. (2005): Exhaust gas aftertreatment for small wood fired appliances – recent progress and field test results. From: Proceed. IEA Seminar on Aerosols from biomass Combustion, Graz
- /31/ Internetseite der Fa. Paul Forsthuber (Österreich): <http://www.phf.at>
- /32/ Tullin, C. (2005): Particle Emissions from Residential Biofuel Boilers and Stoves. From: Proceed. IEA Seminar on Aerosols from biomass Combustion, Graz
- /33/ Schmatloch, V.; Rauch, S. (2005): Design and characterisation of an electrostatic precipitator for small heating appliances. From: Journal of Electrostatics, Vol. 63(2), pp. 85-100
- /34/ Diverse (2001): Leitfaden Bioenergie. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), S. 92-94
- /35/ Vetter, A.; Hering, Th.; Lewandowski, I.; Kauter, D. (2002): Einflussmöglichkeiten auf Biomasseertrag und Brennstoffparameter. In: Standardisierung biogener Festbrennstoffe – Materialband zum Endbericht. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (Hrsg.), Eigenverlag, Stuttgart, 451 S.
- /36/ Anonymus (2000): Schwachgasentsorgung. Sachbericht zum FuE-Vorhaben, Reg.-Nr.: 1101/99, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Eigenverlag
- /37/ Hering, Th.; Pilz, M. (2002): Einflussmöglichkeiten der Brennstoffinhaltsstoffe auf die Emissionen. In: Standardisierung biogener Festbrennstoffe – Materialband zum Endbericht. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (Hrsg.), Eigenverlag, Stuttgart, 451 S.

## Anhang I: Herstellerbefragung

### Fragebogen

- ☐ Hersteller  
☐ Vertrieb (bitte Kesselhersteller angeben): .....

**1. Bieten Sie Feuerungsanlagen an, die für Getreidekörner, Halmgutpellets oder Stroh bzw. deren Mitverbrennung geeignet sind?**

- ☐ Ja:
- ☐ Getreidekörner
    - ☐ Weizen ☐ Roggen ☐ Gerste ☐ Hafer ☐ Triticale
  - ☐ Halmgutpellets
    - ☐ Stroh ☐ Heu ☐ Kleie
  - ☐ Stroh (Häcksel / Ballen) und/oder Ganzpflanze
    - ☐ Weizen ☐ Roggen ☐ Gerste ☐ Hafer ☐ Triticale
- Sonstige:.....
- ☐ Nein ( Bitte weiter zur Frage 8)

**2. In welcher Leistungsklasse werden diese Anlagen angeboten [kW<sub>th</sub>]?**

- |                               |     |     |
|-------------------------------|-----|-----|
| A Getreidekörner:             | von | bis |
| B Halmgutpellets:             | von | bis |
| C Stroh und/oder Ganzpflanze: | von | bis |
| D Sonstige:                   | von | bis |

**3. Ist eine Mitverbrennung der oben genannten Brennstoffe mit Holz möglich? Wenn ja, geben Sie bitte das Mischungsverhältnis an!**

- ☐ Hackschnitzel / Getreidekörner:
- ☐ Holzpellets / Getreidekörner:
- ☐ Hackschnitzel / Halmgutpellets:
- ☐ Holzpellets / Halmgutpellets:
- ☐ Sonstige: \_\_\_\_\_

**4. Nach welchem Feuerungsprinzip arbeiten die Anlagen?**

- ☐ Unterschubfeuerung
- ☐ Vorofenfeuerung
- ☐ Rostfeuerung
- ☐ Wirbelschicht
- ☐ Sonstige: \_\_\_\_\_

- 5a. Welche Emissionsniveaus werden mit diesen Brennstoffen erreicht? Geben Sie bitte auch den O<sub>2</sub>-Bezug an!**

Staub:

CO:

NO<sub>x</sub>:

SO<sub>x</sub>:

Sonstige: \_\_\_\_\_

- 5b. Existieren für diese Anlagen Prüfprotokolle? Wenn ja, wo und in welchem Jahr wurden die Kessel getestet (TÜV, BLT, etc.)?**

☐ Ja: \_\_\_\_\_

☐ Nein

- 6. Sind für diese Anlagen Sekundärmaßnahmen notwendig in Bezug auf die 1. BImSchV bzw. TA Luft? Wenn ja, welche (Staubfilter Elektrofilter, Multizyklone, etc.)?**

☐ Ja: \_\_\_\_\_

☐ Nein

- 7. Wie viele Referenzanlagen ihrer Firma existieren in Europa (Deutschland, Thüringen)?**

Europa:

Deutschland:

Thüringen:

- 8. Welche Haupthindernisse sehen Sie aktuell, die eine energetische Nutzung der oben aufgeführten Biomasse erschweren bzw. verhindern?**

☐ gesetzliche Rahmenbedingungen

Welche?: \_\_\_\_\_

☐ zu hohe Investitionskosten

☐ zu aufwendige Anlagentechnik

☐ kein Markt

☐ ethische Vorbehalte (Getreideverbrennung)

☐ Sonstige: \_\_\_\_\_

**9. Welche Maßnahmen wären Ihrer Meinung nach dazu geeignet, die energetische Nutzung landwirtschaftlicher Biomassen voranzutreiben?**

- ☐ Markteinführungsprogramm (z.B. „1000 Höfe-Programm“)
- ☐ gesetzliche Übergangsregeln (Emissionsschutz)
- ☐ Sonstige: \_\_\_\_\_

**10. Sind Sie damit einverstanden, dass die von Ihnen gegebenen Informationen Aufnahme in unsere Datenbank finden?**

- ☐ Ja
- ☐ Nein

Was Sie uns sonst noch gern mitteilen möchten:

Die Zusendung von Prospektmaterial, *auch für den Brennstoff Holz*, ist ausdrücklich erwünscht!

**Kontakt:** Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft  
Referat Thüringer Zentrum für Nachwachsende Rohstoffe  
Dipl.-Ing. Thomas Hering  
Apoldaer Str. 4  
07778 Dornburg  
Tel.: 036427 / 868 – 110 Fax: 036427 / 22340  
mailto: t.hering@dornburg.tll.de  
Internet: http://www.tll.de/nawaro

## Form

- ☐ manufacturer
- ☐ distribution (please state the combustion station manufacturer): .....

**1. Do you offer biomass combustion stations which are suitable for the combustion of grain, straw or strawpellets respectively the co-combustion of the known solid fuels?**

- ☐ Yes:
- ☐ grain
- ☐ wheat    ☐ rye    ☐ barley    ☐ oat    ☐ triticale
- ☐ straw/pellets
- ☐ straw    ☐ hay    ☐ bran
- ☐ straw (chaff / bale) and/or whole plant
- ☐ wheat    ☐ rye    ☐ barley    ☐ oat    ☐ triticale
- other: .....
- ☐ No ( Please, go to question 7!)

**2. Which thermal output have these combustion stations [kW<sub>th</sub>]?**

- |                              |      |    |
|------------------------------|------|----|
| a) grain:                    | from | to |
| b) straw/pellets:            | from | to |
| c) straw and/or whole plant: | from | to |
| d) other:                    | from | to |

**3. Is a co-combustion with wood possible? If yes, what is the best ratio of components?**

- ☐ wood chips / grain:
- ☐ wood pellets / grain:
- ☐ wood chips / strawpellets:
- ☐ wood pellets / strawpellets:
- ☐ other: .....

#### 4. What is the principle of the combustion?

- ☐ underfeed stoker
- ☐ dual - chamber furnace
- ☐ grate firing
- ☐ fluidized bed
- ☐ other: .....



**5a. Which emission levels are reached with the in 1. known fuels [mg/m<sup>3</sup>; to refer to ... % O<sub>2</sub>] ?**

Dust:

CO:

NO<sub>x</sub>:

HCl:

SO<sub>x</sub>:

other:

**5b. Do test reports exist for your combustion stations? If yes, where and in which year the boilers were tested?**

☐ Yes: .....

☐ No

**6. Do you offer filter techniques such as cyclones, baghousefilters or electric filters for your biomass combustion stations?**

☐ Yes: .....

☐ No

**7. How many reference assets do exist in Europe (Germany, Thuringia)?**

Europe:

Germany:

Thuringia:

**8. What are your experiences with the German market? Which main barriers do you see that prevent an energy recovery of agriculturally biomass?**

☐ administrative barriers

Which?: .....

☐ overspending investment costs

☐ no market

☐ ethically provisos (combustion of grain)

☐ other: .....

**9. Which measures have to be taken in your opinion to push the energy recovery of agriculturally biomass?**

- ☐ programme to promote agricultural biomass
- ☐ lower emission protection standards
- ☐ other: .....

**10. Do you agree that the given information can be used for our data base?**

- ☐ Yes
- ☐ No


other information you want to give us:

**The sending of your product brochures to us is explicit desired!**





**contact:** Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft  
Referat Thüringer Zentrum für Nachwachsende Rohstoffe  
Dipl.-Ing. Thomas Hering  
Apoldaer Str. 4  
07778 Dornburg  
Germany  
Tel.: (+49)36427 / 868 – 110 Fax: (+49)36427 / 22340  
mailto: t.hering@dornburg.tll.de  
Internet: http://www.tll.de/nawaro

## Anhang II: Datenblätter des Dänischen Technologischen Institutes

### Getreide

 **TEKNOLOGISK  
INSTITUT**

ENERGI


 Kedler og ovne  Prøvestationen  Forbrugerinformation  Fabrikantinformation


Typegodkendte fyringsanlæg

[Forside](#)  
[Søgning](#)  
[Beregning](#)  
[Vejledning](#)  
[Vis hele listen](#)

**BAXI** Multi-Heat 2.5 m. iltst.  
**Anlægstype:** Kompaktanlæg  
**Beskrivelse:** -  
**Bemærkninger:** Fås også uden iltstyring. Fås også til flis

**Ydelse:** 7,6 - 23 kW  
**Virkningsgrad:** 87 - 88 %  
**CO-emission:** 113 - 1694 mg/m<sup>3</sup>  
**Støv:** 290 mg/m<sup>3</sup>



 **TEKNOLOGISK  
INSTITUT**

ENERGI

 Kedler og ovne  Prøvestationen  Forbrugerinformation  Fabrikantinformation

Typegodkendte fyringsanlæg

[Forside](#)  
[Søgning](#)  
[Beregning](#)  
[Vejledning](#)  
[Vis hele listen](#)

**BAXI** Multi-Heat 4.0  
**Anlægstype:** Kompaktanlæg  
**Beskrivelse:** -  
**Bemærkninger:** Tidligere benævnt Multiheat S3i

**Ydelse:** 9,3 - 37 kW  
**Virkningsgrad:** 90 - 89 %  
**CO-emission:** 279 - 595 mg/m<sup>3</sup>  
**Støv:** 160 mg/m<sup>3</sup>



## Typegodkendte fyringsanlæg

**Forside**  
**Søgning**  
**Beregning**  
**Vejledning**  
**Vis hele listen**

<b>Passat</b>	<b>Compact C4</b>
<b>Anlægstype:</b>	Kompaktanlæg
<b>Beskrivelse:</b>	-
<b>Bemærkninger:</b>	Fås også med iltstyring

<b>Ydelse:</b>	11 - 36 kW
<b>Virkningsgrad:</b>	91 - 88 %
<b>CO-emission:</b>	500 - 1463 mg/m3
<b>Støv:</b>	236 mg/m3



## Typegodkendte fyringsanlæg

[Forside](#)  
[Søgning](#)  
[Beregning](#)  
[Vejledning](#)  
[Vis hele listen](#)

<b>Pilevang</b>	<b>PA 02-30</b>
<b>Anlægstype:</b>	Kompaktanlæg
<b>Beskrivelse:</b>	-
<b>Bemærkninger:</b>	Godkendelsen gælder kun automatisk fyring

<b>Ydelse:</b>	6,1 - 26 kW
<b>Virkningsgrad:</b>	82 - 87 %
<b>CO-emission:</b>	109 - 224 mg/m3
<b>Støv:</b>	278 mg/m3



**Typegodkendte fyringsanlæg**

[Forside](#)  
[Søgning](#)  
[Beregning](#)  
[Vejledning](#)  
[Vis hele listen](#)

**REFO**

**Anlægstype:** Kompaktanlæg  
**Beskrivelse:** -  
**Bemærkninger:** Ingen

**REFO 40**

**Ydelse:** 9,1 - 35 kW  
**Virkningsgrad:** 88 - 86 %  
**CO-emission:** 9 - 225 mg/m<sup>3</sup>  
**Støv:** 244 mg/m<sup>3</sup>



**Typegodkendte fyringsanlæg**

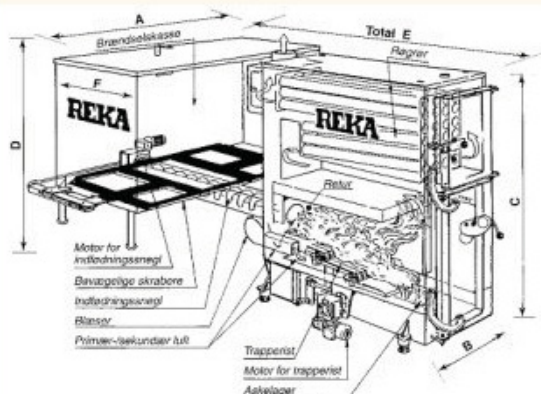
[Forside](#)  
[Søgning](#)  
[Beregning](#)  
[Vejledning](#)  
[Vis hele listen](#)

**REKA**

**Anlægstype:** Automatkedel med trapperist  
**Beskrivelse:** -  
**Bemærkninger:** Ingen

**HKRST-FSK 30**

**Ydelse:** 9,8 - 33 kW  
**Virkningsgrad:** 77 - 89 %  
**CO-emission:** 250 - 1870 mg/m<sup>3</sup>  
**Støv:** 203 mg/m<sup>3</sup>



Typegodkendte fyringsanlæg

[Forside](#)  
[Søgning](#)  
[Beregning](#)  
[Vejledning](#)  
[Vis hele listen](#)

**Twin Heat** Cpi 12 m/iltst.  
**Anlægstype:** Kompakt stokerkedel  
**Beskrivelse:** Kan anvendes til korn, flis eller træpiller  
**Bemærkninger:** Ingen

**Ydelse:** 2,8 - 11 kW  
**Virkningsgrad:** 80 - 84 %  
**CO-emission:** 169 - 577 mg/m<sup>3</sup>  
**Støv:** 215 mg/m<sup>3</sup>



Typegodkendte fyringsanlæg

[Forside](#)  
[Søgning](#)  
[Beregning](#)  
[Vejledning](#)  
[Vis hele listen](#)

**Twin Heat** M20i+ A2 m/iltst.  
**Anlægstype:** Løs stoker med kedel type Variant A2  
**Beskrivelse:** -  
**Bemærkninger:** Godkendelsen gælder kun automatisk fyring

**Ydelse:** 5,1 - 22 kW  
**Virkningsgrad:** 82 - 87 %  
**CO-emission:** 71 - 281 mg/m<sup>3</sup>  
**Støv:** 337 mg/m<sup>3</sup>





Typegodkendte fyringsanlæg

[Forside](#)  
[Søgning](#)  
[Beregning](#)  
[Vejledning](#)  
[Vis hele listen](#)

**Twin Heat** M40i+A4 m/iltst.

**Anlægstype:** Løs stoker med kedel type Variant A4

**Beskrivelse:** -

**Bemærkninger:** Godkendelsen gælder kun automatisk fyring

**Ydelse:** 10,8 - 40 kW

**Virkningsgrad:** 86 - 84 %

**CO-emission:** 283 - 464 mg/m<sup>3</sup>

**Støv:** 296 mg/m<sup>3</sup>



Typegodkendte fyringsanlæg

[Forside](#)  
[Søgning](#)  
[Beregning](#)  
[Vejledning](#)  
[Vis hele listen](#)

**Twin Heat** M80i

**Anlægstype:** Løs stoker med kedel type Variant A8

**Beskrivelse:** -

**Bemærkninger:** Godkendelse gælder kun automatisk fyring

**Ydelse:** 22 - 70 kW

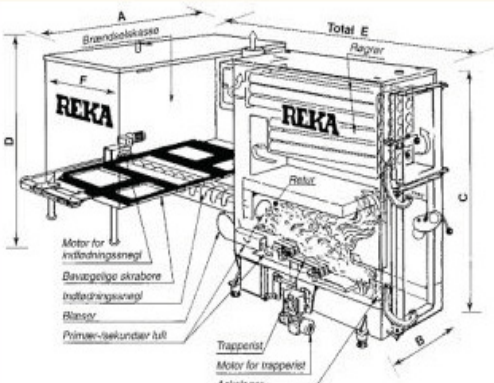
**Virkningsgrad:** 85 - 90 %

**CO-emission:** 59 - 594 mg/m<sup>3</sup>

**Støv:** 338 mg/m<sup>3</sup>



## Stroh

TEKNOLOGISK INSTITUT		ENERGI	
<a href="#">Kedler og ovne</a> <a href="#">Prøvestationen</a> <a href="#">Forbrugerinformation</a> <a href="#">Fabrikantinformation</a>			
Typegodkendte fyringsanlæg			
<a href="#">Forside</a> <a href="#">Søgning</a> <a href="#">Beregning</a> <a href="#">Vejledning</a> <a href="#">Vis hele listen</a>	<b>REKA</b>	<b>HKRST 60</b>	<b>Ydelse:</b> 15 - 54 kW
	<b>Anlægstype:</b>	Automatisk halmfyr med trapperist	<b>Virkningsgrad:</b> 77 - 85 %
	<b>Beskrivelse:</b>	-	<b>CO-emission:</b> 213 - 631 mg/m <sup>3</sup>
	<b>Bemærkninger:</b>	Ingen	<b>Støv:</b> 318 mg/m <sup>3</sup>
			

TEKNOLOGISK INSTITUT		ENERGI	
<a href="#">Kedler og ovne</a> <a href="#">Prøvestationen</a> <a href="#">Forbrugerinformation</a> <a href="#">Fabrikantinformation</a>			
Typegodkendte fyringsanlæg			
<a href="#">Forside</a> <a href="#">Søgning</a> <a href="#">Beregning</a> <a href="#">Vejledning</a> <a href="#">Vis hele listen</a>	<b>Passat</b>	<b>HO-180</b>	<b>Ydelse:</b> 53 - 187 kW
	<b>Anlægstype:</b>	Automatisk halmfyr med halmoprøver	<b>Virkningsgrad:</b> 84 - 88 %
	<b>Beskrivelse:</b>	-	<b>CO-emission:</b> 213 - 763 mg/m <sup>3</sup>
	<b>Bemærkninger:</b>	Ingen	<b>Støv:</b> 473 mg/m <sup>3</sup>
			



Typegodkendte fyringsanlæg

[Forside](#)  
[Søgning](#)  
[Beregning](#)  
[Vejledning](#)  
[Vis hele listen](#)

**Overdahl K-150**  
**Anlægstype:** Portionsfyret halmkedel  
**Beskrivelse:** -  
**Bemærkninger:** Skal installeres med akkumuleringstank

**Ydelse:** 168 - 168 kW  
**Virkningsgrad:** 83 - 83 %  
**CO-emission:** 1075 - 1075 mg/m<sup>3</sup>  
**Støv:** 153 mg/m<sup>3</sup>



Typegodkendte fyringsanlæg

[Forside](#)  
[Søgning](#)  
[Beregning](#)  
[Vejledning](#)  
[Vis hele listen](#)

**Alcon AKT-450**  
**Anlægstype:** Halmfyr til bigballer  
**Beskrivelse:** -  
**Bemærkninger:** Skal installeres med akkumuleringstank

**Ydelse:** 461 - 461 kW  
**Virkningsgrad:** 88 - 88 %  
**CO-emission:** 795 - 795 mg/m<sup>3</sup>  
**Støv:** mg/m<sup>3</sup>



**Typegodkendte fyringsanlæg**

[Forside](#)  
[Søgning](#)  
[Beregning](#)  
[Vejledning](#)  
[Vis hele listen](#)

**K.F. Halmfyr**

**KF 109**

**Anlægstype:** Halmfyr til 2 stk. bigballer

**Beskrivelse:** Udendørs unit

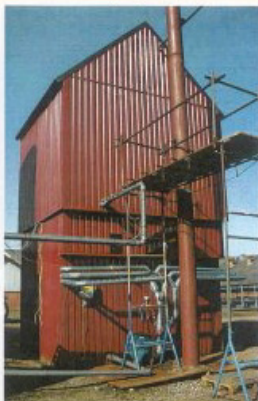
**Bemærkninger:** EU-krav til støv ikke opfyldt

**Ydelse:** 570 - 570 kW

**Virkningsgrad:** 84 - 84 %

**CO-emission:** 651 - 651 mg/m<sup>3</sup>

**Støv:** 229 mg/m<sup>3</sup>



## Anhang III: Messverfahren und Versuchsaufbau der Feldmessungen TLL /TLUG

### Kontinuierliche Messungen

In den Verbrennungsversuchen wurden folgende Analysemethoden für die kontinuierlich zu messenden Abgaskomponenten eingesetzt:

#### *Nichtdispersive Infrarotabsorption (NDIR)*

Die nach diesem Prinzip arbeitenden Messgeräte werden zur Messung von CO-, CO<sub>2</sub>-, NO-, N<sub>2</sub>O- und SO<sub>2</sub>- Konzentrationen eingesetzt. Es kamen Messgeräte N der Firma Maihak AG zum Einsatz.

Regelmäßig erfolgte die Kalibrierung der Messgeräte mit folgenden zertifizierten Prüfgasen:

CO	834	mg/m <sup>3</sup>	Messgerät: UNOR 6N
CO <sub>2</sub>	18,1	Vol.-%	Messgerät: UNOR 610
NO	805	mg/m <sup>3</sup>	Messgerät: UNOR 610
SO <sub>2</sub>	798	mg/m <sup>3</sup>	Messgerät: UNOR 610
N <sub>2</sub> O	52,5	mg/m <sup>3</sup>	Messgerät: UNOR 6N
O <sub>2</sub>	25	Vol.-%	Messgerät: UNOR 610

#### *Berechnung der NO<sub>2</sub>-Konzentration*

Für diese Aufgabe wird ein NO<sub>2</sub>/NO- Konverter INOX-CV der Firma INSAT AG eingesetzt. Das im Messgas enthaltene NO<sub>2</sub> wird im Konverter zu NO reduziert. Das reduzierte NO und das bereits enthaltene NO im Messgas gelangt zur Messeinheit und wird detektiert. Die Summe aus NO und reduziertem NO<sub>2</sub> ergibt den Gehalt an NO<sub>x</sub> (Summenwert) im Messgas.

#### *Flammenionisationsdetektor (FID)*

Mit dem FID wurden die organischen Kohlenstoffverbindungen als Summe des gesamtorganischen Kohlenstoffes (C<sub>ges</sub>) gemessen. Das Messgerät FID-Analysator Modell 3006 der Firma Bernath-Atomic kam zum Einsatz.

Zu Beginn jedes Versuchstages wurde das FID mittels eines zertifizierten Prüfgases (Propan) von 133 mg/m<sup>3</sup> kalibriert.

#### *Magnetodynamisches Messverfahren*

Die paramagnetischen Eigenschaften des Sauerstoffs werden bei diesem Messverfahren zur Bestimmung des O<sub>2</sub> - Gehaltes genutzt. Das Messgerät OXOR 610 der Firma Maihak kam dabei zum Einsatz.

## Diskontinuierliche Messungen

In den Verbrennungsversuchen wurden folgende Analysemethoden für die diskontinuierlich zu messenden Abgaskomponenten eingesetzt:

### *Gesamtstaub-Rohgas: VDI 2066 Blatt 2*

Zur Bestimmung des Staubgehaltes wurden drei Messungen mit jeweils 30 Minuten Messdauer durchgeführt. Die Probe wurde isokinetisch dem Rauchgas entnommen.

Das Rückhaltesystem der Partikelemission bestand aus Titanfilterhülse gestopft mit feinfaseriger Quarzwolle und nachgeschaltetem Planfilter aus Quarzfaser (Munktel 360).

Analytik: Trocknung und Abkühlung (Eksikator) der Filter, anschließende Auswage

Messgeräte: DMS-Waage, MC BB 100 der Satorius AG

### *Gesamtstaub: 1. BImSchV*

Die Staubmessungen mit Hilfe des Schornsteinfegermessgerätes SM96-CO der Fa. Woehler wurden nach Anlage III der 1. BImSchV durchgeführt (drei Messungen mit jeweils 15 Minuten Messdauer).

Analytik: Trocknung und Abkühlung (Eksikator) der Filter, anschließende Auswage

Messgeräte: DMS-Waage, MC BB 100 der Satorius AG

### *Chlorwasserstoff als HCl: nach VDI 3480 Blatt 1*

Die Probenahme erfolgte mittels beheizter Entnahmesonde, Partikelfilter und 2 in Reihe geschalteter Gaswaschflaschen, welche mit destilliertem Wasser als Absorptionsmittel gefüllt waren.

Analytik: Methode nach Mohr, Titration mit Silbernitratlösung

### *PCDD/F, PAK: nach EN 1948-1, 2, 3*

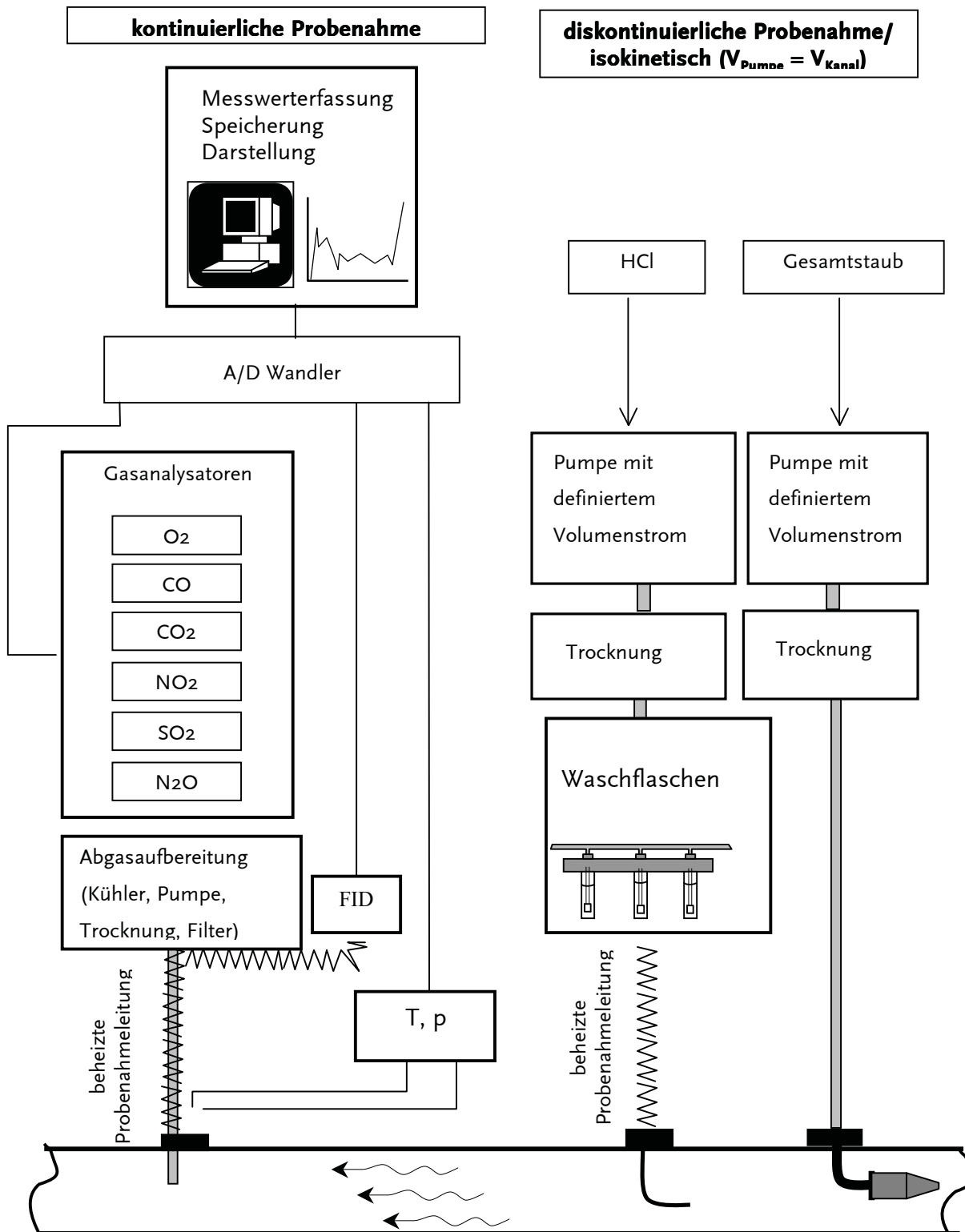
Die Probenahme wurde mittels gekühlter Sonde, Kondensatgefäß und XAD- Kartusche durchgeführt. In das Kondensatgefäß wurden 300 ml Wasser (für HPLC) vorgelegt. Diese Vorlage wurde mit  $^{13}\text{C}_{12}$  -12378 PeCDF,  $^{13}\text{C}_{12}$  -123789HxCDF,  $^{13}\text{C}_{12}$  -1234789HpCDF gespikt (Probenahmestandard). Die Probe wurde über 5 Stunden dem Rauchgas entnommen, so dass ca. 2 bis 2,5 m<sup>3</sup> i. N. tr. Teilgasvolumen pro Stunde gesammelt werden konnte. Die Probenahme erfolgte isokinetisch.

Analytik:

Das gesamte Kondensat sowie ggf. das Sondenmaterial wurde einer dreifachen flüssig/flüssig-Extrakten mit Toluol unterzogen. Das Toluol wurde vorher zur mehrstufigen Spülung der Originalflaschen eingesetzt. Adsorbens und Staubfilter wurden mit dem Toluol aus der Extraktion 16 h im Soxhlet extrahiert. Die Proben wurden zur  $^{13}\text{C}_{12}$ -markierten PCDD/F (alle 2378-Kongeneren

der zu analysierenden Homologengruppen) versetzt (Extraktionsstandard). Nach säulenchromatographischer Reinigung erfolgte die Zugabe von  $^{13}\text{C}_{12}$ -1234-TetraCDD (Spritzenstandard), um die Wiederfindungsraten der vorher eingesetzten  $^{13}\text{C}_{12}$ -markierten PCDD/F-Standards bestimmen zu können. Zur Analyse wurde der Gaschromatograph HP 5890 II, gekoppelt mit dem HP-MSD 5970, verwendet. Als Kapillare fand eine SP 2331 Verwendung. Wie auch in der Literatur beschrieben, lassen sich die 12378- und 12348-PentaCDF sowie die 123478- und 123479-HexaCDF an SP-2331 als GC-Phase nicht trennen. Es werden deshalb die entsprechenden Summenwerte angegeben, die als Maximalwerte der Kongeneren mit 2378-Cl-Substitutionsmuster anzusehen sind. Die Wiederfindung der eingesetzten internen Standards (Extraktionsstandard) bezogen auf das  $^{13}\text{C}_{12}$ -1234-TetraCDD, als Maß für die Zuverlässigkeit der Probenaufbereitung, sollten zwischen 50% und 115% liegen.

Messgeräte: GC 5890 II von Hewlett Packard,  
MSD 5971 bzw. 5973 von Hewlett Packard



Abgaskanalbereich zwischen Kessel und Schornstein